

DE 101 29 300 A1

Abstract

The gas meter according to the invention for the purpose of calculating the charges is adapted to measure the mass flow of the gas. It comprises a mass flow detector (4), a control (5) and a display (6). The gas meter may further comprise a card reader (7) and a valve (8). The mass flow detector is based on a sensor element that is integrated on a semiconductor chip together with a digital and analogous evaluation unit. Since it is the mass flow and not the flow speed or the volume of the consumed gas that is measured, the value obtained is independent of the pressure and is substantially based on the calorific value of the gas.

Translation of paragraph [0090]:

The sensor member 14 is arranged on a semiconductor substrate 21 of monocrystalline silicon, in which an opening 22 has been etched out. The term "opening" is to be understood as a simple recess in semiconductor substrate 21 as well as an opening extending all through semiconductor substrate 21. Opening or recess 22 is covered by a thin membrane of a dielectric. A resistive heating 24 of three resistors is arranged on membrane 23. Two thermoelements 25, 26 are provided symmetrically to heating 24, which serve as temperature sensors. More accurately, these are thermopiles consisting of several thermoelements arranged in series. ...



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND

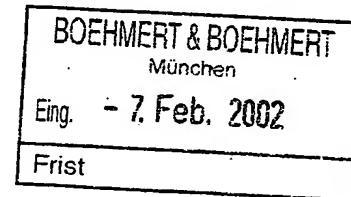


DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ Off nlegungsschrift  
⑩ DE 101 29 300 A 1

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 01 F 5/00**  
G 01 F 15/00  
G 01 F 1/00  
G 01 F 1/68

⑳ Aktenzeichen: 101 29 300.3  
㉔ Anmeldetag: 18. 6. 2001  
㉕ Offenlegungstag: 7. 2. 2002



DE 101 29 300 A 1

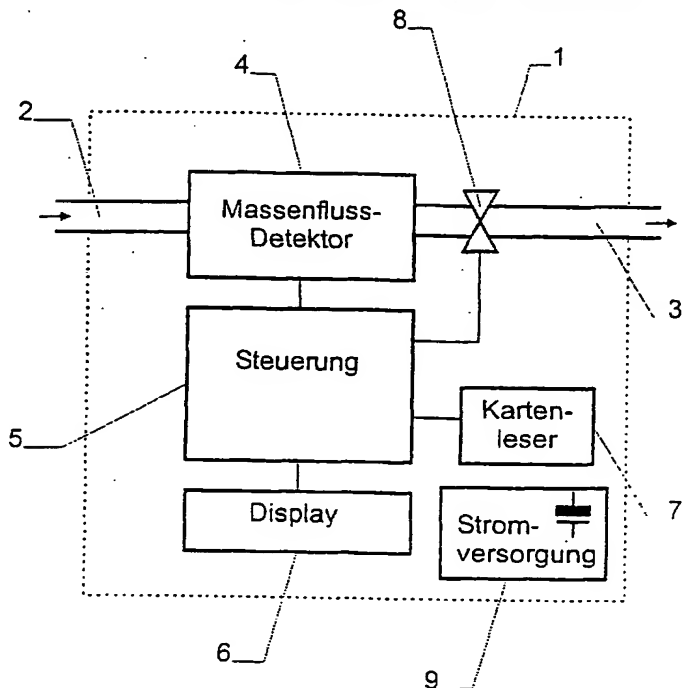
③0 Unionspriorität:  
1252/00 23. 06. 2000 CH  
⑦1 Anmelder:  
SENSIRION AG, Zürich, CH  
⑦4 Vertreter:  
BOEHMERT & BOEHMERT, 80336 München

⑦2 Erfinder:  
Mayer, Felix, Zürich, SH; Häberli, Andreas Martin,  
Wetzikon, CH; Vanha, Ralph Steiner, Zürich, CH;  
Rothacher, Urs Martin, Zürich, CH

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Massenfluss-Detektor, insbesondere Gaszähler, und Verfahren zum Datenaustausch zwischen Bausteinen

⑤7 Der erfindungsgemäße Gaszähler zur Gebührenbe-  
rechnung ist ausgestaltet, um den Massenfluss des Gases  
zu messen. Er besitzt einen Massenfluss-Detektor (4), eine  
Steuerung (5) und eine Anzeige (6). Weiter kann er einen  
Kartenleser (7) und ein Ventil (8) umfassen. Der Massen-  
fluss-Detektor basiert auf einem Sensorelement, das zu-  
sammen mit einer digitalen und analogen Auswertung  
auf einem Halbleiterbaustein integriert ist. Da der Mas-  
senfluss und nicht die Flussgeschwindigkeit bzw. das Vo-  
lumen des konsumierten Gases gemessen wird, ergibt  
sich ein vom Druck unabhängiger Wert, der im wesentli-  
chen durch den Brennwert des Gases bestimmt ist.



DE 101 29 300 A 1

## Beschreibung

- [0001] Die Erfindung betrifft einen Gaszähler, ein Verfahren zum Ermitteln einer konsumierten Gasmenge, einen Massenflussensor, einen Halbleiterbaustein und ein Verfahren zum seriellen Datenaustausch zwischen zwei Bausteinen gemäss Oberbegriff der unabhängigen Ansprüche.
- [0002] Gaszähler sind Geräte, mit denen der Gasverbrauch eines Konsumenten gemessen wird, so dass die verbrauchte Gasmenge dem Konsumenten in Rechnung gestellt werden kann. Normale volumetrische Gaszähler haben den Nachteil, dass ihre Messwerte abhängig von Druck und Temperatur sind. Dies führt zu einer ungerechten Berechnung der Gaskosten.
- [0003] In einem ersten Aspekt der Erfindung stellt sich deshalb die Aufgabe, einen Gaszähler und ein Verfahren der eingangs genannten Art bereitzustellen, die möglichst genaue Verbrauchswerte bestimmen, um eine gerechtere Berechnung der Gaskosten zu ermöglichen.
- [0004] Anspruchsgemäss wird diese Aufgabe gelöst, indem der Massenfluss des Gases bestimmt und über die Zeit integriert wird. Somit wird also nicht das Volumen sondern die Masse des konsumierten Gases ermittelt. Da die Masse auch dem Brennwert des Gases entspricht, erlaubt dies eine gerechtere Gebührenberechnung.
- [0005] Vorzugsweise weist der Gaszähler einen integrierten Massenflussdetektor auf mit einem Sensorelement, einem Analogteil und einem Digitalteil. Im Digitalteil werden die Messdaten linearisiert. Getrennt davon ist ein Mikrocontroller vorgesehen, der den Massenfluss über die Zeit integriert.
- [0006] In einem anderen Aspekt der Erfindung ist ein Massenflussensor auf einem Halbleitersubstrat bereitzustellen, der eine möglichst hohe Genauigkeit bei geringen Herstellungskosten besitzt.
- [0007] Diese Aufgabe wird gelöst, indem auf dem Halbleitersubstrat gleichzeitig noch ein Analogteil und ein Digitalteil integriert werden. Im Analogteil werden die Signale vorverarbeitet, d. h. zum Beispiel verstärkt, und sodann digitalisiert. Im Digitalteil werden die digitalisierten Daten linearisiert. Indem die Teile alle auf einem gemeinsamen Halbleitersubstrat integriert werden, ergibt sich eine Reduktion der Herstellungskosten. Dennoch kann dank der Linearisierung eine hohe Genauigkeit, selbst über einen grossen Bereich der Gasströmung, erzielt werden.
- [0008] Um Störungen der schwachen Signale vom Sensor möglichst zu vermeiden, wird der Analogteil zwischen dem Digitalteil, der für die meisten Störungen verantwortlich ist, und dem Sensorelement angeordnet.
- [0009] In einem weiteren Aspekt der Erfindung ist ein Massenflussensor auf einer Membran bereitzustellen, welcher mechanisch möglichst robust ist.
- [0010] Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass über der Membran eine tensile Passivierungsschicht aufgebracht wird. Eine derartige Passivierungsschicht vermag die Membran unter einen tensilen Gesamtstress zu setzen. Dadurch wird ein Durchbiegen, welches z. B. eine Herabsetzung der mechanischen Stabilität verursachen würde, verhindert.
- [0011] In einem weiteren Aspekt der Erfindung ist ein Massenflussensor auf einer Membran bereitzustellen, welcher eine schaltungstechnisch einfach aufgebaute Heizung besitzt.
- [0012] Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass die Heizung aus mehreren Widerständen besteht, welche sich parallel zueinander als Leiterbahnen über die Öffnung erstrecken und auf einer Seite miteinander verbunden sind. Dies erlaubt es, die stromführenden Versorgungsleitungen beide von nur einer Seite des Sensors zuzuführen. Vorzugsweise wird die Heizung so angesteuert, dass die Leiterbahnen in zwei Gruppen aufgeteilt werden, die in Serie liegen. Ein Strom wird durch beide Gruppen geführt und so geregelt, dass die Spannung über einer der Gruppen konstant ist. Dies erlaubt es, bei gegebener Referenzspannung in eleganter Weise die Heizung in einem gewünschten Leistungsbereich zu betreiben.
- [0013] In einem weiteren Aspekt der Erfindung ist ein Massenflussensor auf einer Membran bereitzustellen, welcher geringe Alterung zeigt.
- [0014] Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass um die Membran eine Scribe Line angeordnet wird. Es zeigt sich, dass Fremdionen und Fremdmoleküle insbesondere im Bereich der Membran in die dielektrischen Schichten, die das Halbleitersubstrat bedecken, eindringen können. Durch die Scribe Line können die Ionen daran gehindert werden, durch die dielektrischen Schichten zu den weiteren, auf dem Halbleitersubstrat integrierten Elementen zu wandern. Als solche Elemente kommen insbesondere Schaltungselemente, wie z. B. Transistoren, aber auch Leitungen und dergleichen in Frage.
- [0015] Vorzugsweise sind auf dem Substrat in Gruppen aufgeteilte Schaltungselemente integriert, wobei jede Gruppe von je einer Scribe Line umfasst wird. Dadurch werden die Gruppen voneinander getrennt.
- [0016] In einem weiteren Aspekt der Erfindung ist ein Halbleiterbaustein bereitzustellen, der eine geringe elektrische Störanfälligkeit aufweist.
- [0017] Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass Leitungen, welche störanfällig sind und/oder störende Signale tragen, von einem Schirm aus leitfähigem Material umgeben werden. Vorzugsweise wird dieser Schirm von einer leitenden Diffusionsschicht im Substrat und einer leitfähigen Deckschicht gebildet.
- [0018] In einem weiteren Aspekt der Erfindung ist ein Massenflussensor mit Halbleitersubstrat, einer im Halbleitersubstrat über einer Öffnung angeordneten Membran, mit einer sich über die Membran erstreckenden Heizung und mit beidseits der Heizung angeordneten Thermoelementen bereitzustellen, der eine hohe Zuverlässigkeit besitzt.
- [0019] Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass ein Selbsttest-Mechanismus vorgesehen ist, mit welchem die Spannung über mindestens einem der Thermoelemente mit einem Sollbereich verglichen wird. Bei einwandfreiem Betrieb des Geräts muss dieser Temperaturunterschied bzw. die Spannung über den Thermoelementen im Sollbereich liegen. Eine Abweichung zeugt von einem Defekt der Membran, eines der Thermoelemente oder der Heizung. Vorzugsweise wird die Summe der Spannungen der Thermoelemente gemessen, um gleichzeitig beide Thermoelemente zu prüfen.
- [0020] In einem weiteren Aspekt stellt sich die Aufgabe, ein Verfahren zum seriellen Datenaustausch zwischen zwei Bausteinen bereitzustellen, welches es erlaubt, in möglichst einfacher Weise den Datenaustausch von der Bereitschaft eines der Bausteine abhängig zu machen.
- [0021] Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass der zweite Baustein nach dem Empfang eines Anwahlsignals auf der Datenleitung ein Zustandssignal erzeugt, welches in einen aktiven Zustand geht, sobald der zweite Baustein zur Ausgabe von Daten bereit ist. Dies erlaubt es in einfacher Weise, über nur eine Datenleitung sowohl Zustandsinformationen, als

auch Dateninformationen auszutauschen.

- [0022] Fig. 1 ein Blockdiagramm eines erfindungsgemässen Gaszählers,
- [0023] Fig. 2 eine schematische Darstellung einer möglichen Ausführung des Massenfluss-Detektors,
- [0024] Fig. 3 mögliche Abhängigkeiten der Strömungsgeschwindigkeit  $v_B$  im Bypass von der Strömungsgeschwindigkeit  $v_H$  im Hauptkanal,
- [0025] Fig. 4 einen Massenfluss-Detektor mit sublinearer Response,
- [0026] Fig. 5 einen Massenfluss-Detektor mit linearer Response,
- [0027] Fig. 6 einen Massenfluss-Detektor mit Lochblende im Hauptkanal,
- [0028] Fig. 7 einen Massenfluss-Detektor mit einer Verengung im Hauptkanal,
- [0029] Fig. 8 einen Massenfluss-Detektor mit einer Venturi-Düse,
- [0030] Fig. 9 einen Massenfluss-Detektor mit einer Staudüse,
- [0031] Fig. 10 einen Schnitt durch das Sensorelement,
- [0032] Fig. 11 eine Draufsicht auf einen Halbleiterbaustein mit Sensorelement und Elektronikschaltungen,
- [0033] Fig. 12 ein Blockdiagramm des Bausteins nach Fig. 11,
- [0034] Fig. 13 die Struktur einer "Scribe Line",
- [0035] Fig. 14 die Struktur einer abgeschirmten Leitung mit zwei Kanälen,
- [0036] Fig. 15 die Heizungssteuerung,
- [0037] Fig. 16 ein Blockdiagramm der MUX/Verstärker-Einheit,
- [0038] Fig. 17 den Aufbau eines Verstärkers mit vier Stufen,
- [0039] Fig. 18 eine Stufe des Verstärkers von Fig. 17,
- [0040] Fig. 19 ein Schaltbild des A/D-Wandlers,
- [0041] Fig. 20 ein Buffer für Signale vom Analogteil zum Digitalteil,
- [0042] Fig. 21 ein Blockschaltbild des Digitalteils und der Steuerung,
- [0043] Fig. 22 ein Zeitdiagramm für die Signale des seriellen Interfaces,
- [0044] Fig. 23 ein Blockschaltbild des Taktgebers,
- [0045] Fig. 24 ein Zeitdiagramm der Signale des Taktgebers.

#### Übersicht

- [0046] Fig. 1 zeigt ein Blockdiagramm einer Ausführung der Erfindung in Form eines Gaszählers 1, wie er zur Ermittlung der Gaskosten in einem Haushalt verwendet werden kann.
- [0047] Der Gaszähler besitzt einen Hauptkanal mit einer Eingangsleitung 2 und einer Ausgangsleitung 3 für das zu messende Gas. Zum Messen der Gasmenge ist ein Massenfluss-Detektor 4 vorgesehen, d. h. ein Sensor, mit der die Masse des durchströmenden Gases pro Zeiteinheit ermittelt wird. Eine Steuerung 5 wertet die Resultate des Massenfluss-Detektors 4 aus, betreibt eine Anzeige 6 und z. B. einen Chipkartenleser 7. Ferner kann sie ein Verschlussventil 8 steuern. Eine Stromversorgung 9 speist sämtliche Bauteile, vorzugsweise aus einer Batterie.
- [0048] Im folgenden werden die Teile des Gaszählers 1 im einzelnen beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass die Anwendung einiger dieser Teile nicht auf einen Gaszähler beschränkt ist. So kann z. B. der im folgenden erläuterte Massenfluss-Detektor oder das Sensorelement in einer Vielzahl von Einsatzgebieten eingesetzt werden.

#### Massenfluss-Detektor

- [0049] Der Massenfluss-Detektor 4 misst entweder die Massenrate, d. h. die Masse pro Zeiteinheit oder ein Integral der Massenrate, d. h. die totale Masse. Anstelle der Masse bzw. Massenflussrate kann auch die jeweilige Grösse pro Einheits-Durchflussfläche der Gasleitung ermittelt und sodann umgerechnet werden.
- [0050] Fig. 2 zeigt schematisch den Aufbau des Massenfluss-Detektors. Im folgenden wird als "Massenfluss" der mittlere Massenfluss  $p \cdot v$  verstanden, wobei  $p$  die Dichte und  $v$  die Geschwindigkeit des Gases ist. Soll der gesamte Massenfluss durch den Hauptkanal 2, 3 ermittelt werden, so ist  $p \cdot v_H$  in bekannter Weise zu integrieren, wobei  $v_H$  die mittlere Flussgeschwindigkeit im Hauptkanal ist.
- [0051] In der vorliegenden Ausführung ist am Hauptkanal ein Bypass 10 vorgesehen, der parallel zu einem Abschnitt 11 des Hauptkanals 2, 3 verläuft, mit einem Eingang 12 und einem Ausgang 13. Im Bypass 10 ist ein Sensorelement 14 vorgesehen.
- [0052] Zumindest in einem Bereich 15 zwischen den Mündungen des Bypass 10 ist ein in Fig. 2 grau dargestellter Bereich vorgesehen, in welchem der Flusswiderstand des Gases im Vergleich zum übrigen Hauptkanal erhöht ist, um den Druckabfall  $\Delta p$  zwischen den Mündungen zu erhöhen.
- [0053] Vorzugsweise ist im Sensorelement 14 eine Messanordnung angeordnet, die ein Heizorgan und symmetrisch dazu zwei Temperaturfühler aufweist. Eine bevorzugte Ausführung dieser Anordnung wird weiter unten beschrieben.
- [0054] Die Temperaturen bei den Temperaturfühlern eines derartigen Sensorelements sind abhängig vom Produkt der Flussgeschwindigkeit  $v_B$  im Bypass 10 und der Dichte  $p$  des Gases. Das Ausgangssignal  $S$  des Sensorelements ist also eine Funktion  $f$  des Massenflusses  $p v_B$ , wobei  $v_B$  die Gasgeschwindigkeit am Ort des Sensorelements 14 im Bypass 4 bezeichnet, d. h.

$$S = s(p \cdot v_B). \quad (1)$$

- [0055] Mittels geeigneter Linearisierung kann ein zum Massenfluss proportionales Signal erzeugt werden, so dass

$$S = k \cdot p \cdot v_B. \quad (2)$$

wobei  $k$  eine Konstante ist.

[0056] Das durch den Bypass 10 fließende Gas erzeugt eine Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen den Mündungen der Leitungen 12 und 13. Die Druckdifferenz  $\Delta p$  ist von der Gasgeschwindigkeit  $v_B$  im Bypass 10 abhängig, d. h.

$$\Delta p = f_B(v_B), \quad (3)$$

wobei die Funktion  $f_B$  diese Abhängigkeit beschreibt.

[0057] Andererseits ist diese Druckdifferenz auch von der Strömungsgeschwindigkeit  $v_H$  im Hauptkanal abhängig, d. h.

$$\Delta p = f_H(v_H), \quad (4)$$

wobei die Funktion  $f_H$  die Abhängigkeit des Druckabfalls von der Strömungsgeschwindigkeit im Hauptkanal beschreibt.

[0058] Die Funktionen  $f_B$  und  $f_H$  hängen von der Geometrie des Hauptkanals und des Bypass ab. Bei laminaren Strömungsverhältnissen sind  $f_B$  und  $f_H$  lineare Funktionen. Bei turbulenten Strömungsverhältnissen oder bei Staudruck können  $f_B$  und  $f_H$  auch von höheren Potenzen der jeweiligen Geschwindigkeit, insbesondere vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängen.

[0059] Aus Gleichung (3) und (4) ergibt sich:

$$v_B = f_B^{-1}(f_H(v_H)) = F(v_H). \quad (5)$$

[0060] Wie im folgenden dargestellt, können die Eigenschaften des Massenfluss-Detektors durch geeignete Wahl der Funktion  $F$  bzw. der Funktionen  $f_B$  und  $f_H$  optimiert werden.

[0061] Fig. 3 zeigt verschiedene mögliche Abhängigkeiten der Strömungsgeschwindigkeit  $v_B$  von der Strömungsgeschwindigkeit  $v_H$ . Kurve F1 zeigt eine lineare Abhängigkeit, welche für den Fall auftritt, dass die Funktionen  $f_H$  und  $f_B$  in gleicher Weise von der jeweiligen Geschwindigkeit abhängen. Kurve F2 zeigt eine zunehmend steiler werdende Abhängigkeit, welche z. B. auftritt, wenn  $f_H$  quadratisch von  $v_H$  und  $f_B$  linear von  $v_B$  abhängt. Kurve F3 zeigt eine zunehmend flacher werdende Abhängigkeit, die z. B. dem Fall entspricht, dass  $f_H$  linear von  $v_H$  und  $f_B$  quadratisch von  $v_B$  abhängt.

[0062] Die Steilheit der Kurven von Fig. 3 ist gegeben durch die Ableitung

$$\frac{\partial F(v_H)}{\partial v_H} = \frac{\partial f_B^{-1}(\Delta p)}{\partial \Delta p} \cdot \frac{\partial f_H(v_H)}{\partial v_H} = \left( \frac{\partial f_B(v_B)}{\partial v_B} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial f_H(v_H)}{\partial v_H} \quad (6)$$

[0063] Es zeigt sich, dass eine Abhängigkeit in der Art von Kurve F2 unerwünscht ist. Sie führt dazu, dass bei kleiner Strömungsgeschwindigkeit  $v_H$  die Empfindlichkeit des Massenfluss-Detektors gering ist, da die Strömungsgeschwindigkeit  $v_B$  verhältnismässig schwach von  $v_H$  abhängt, während bei grossen  $v_H$  eine starke Abhängigkeit vorliegt.

[0064] Erwünscht ist vielmehr eine Abhängigkeit in der Art von Kurve F1 oder F3, d. h.  $\delta F(v_H)/\delta v_H$  soll bei kleinem  $v_H$  grösser als oder gleich gross wie bei grossem  $v_H$  sein. Mathematisch ausgedrückt heisst dies

$$\left. \frac{\partial F(v_H)}{\partial v_H} \right|_{v_H=v_1} \geq \left. \frac{\partial F(v_H)}{\partial v_H} \right|_{v_H=v_2}, \quad (7)$$

wobei  $v_1 < v_2$ .

[0065] Ausgedrückt als zweite Ableitung entspricht dies

$$\frac{\partial^2 F(v_H)}{\partial^2 v_H} \leq 0. \quad (8)$$

[0066] Vorzugsweise sollte die Steigung tatsächlich abnehmen, d. h. sublinear und nicht linear sein, um in einem unteren Messbereich eine höhere Empfindlichkeit zu erhalten. Dies ist der Fall, wenn in den Gleichungen (7) bzw. (8) die Operatoren " $\geq$ " bzw. " $\leq$ " durch " $>$ " und " $<$ " ersetzt werden.

[0067] Die Bedingung (8) sollte zumindest für kleine Flussgeschwindigkeiten erfüllt sein (z. B. in den unteren 10% des Messbereichs), vorzugsweise für alle Flussgeschwindigkeiten innerhalb des Messbereichs.

[0068] Bevorzugt ist insbesondere ein Massenfluss-Detektor, in welchem  $f_H$  proportional zu  $v_H$  und  $f_B$  proportional zu  $v_B^2$  oder generell zu  $a_1 \cdot v_B + a_2 \cdot v_B^2$ , mit konstanten  $a_1, a_2$ , ist.

[0069] In der Praxis ist es jedoch nicht immer möglich, eine Abhängigkeit gemäss Kurve F3 zu erhalten, und eine lineare Abhängigkeit gemäss Kurve F1 kann bereits als gut bezeichnet werden. Zumindest sollte in den unteren 10% des Messbereichs die Abweichung vom linearen Verhalten nicht mehr als 10% betragen.

[0070] Fig. 4 zeigt einen Massenfluss-Detektor mit sublinearer Response. Im Hauptkanal ist ein linearer Strömungswiderstand 15' angeordnet, so dass  $\Delta p$  proportional zu  $v_H$  ist. Der Strömungswiderstand kann z. B. aus einer Vielzahl paralleler, enger Kanäle bestehen. Es gilt also  $f_H(v_H) \propto v_H$ .

[0071] Im Bypass ist eine stufenförmige Verengung 17 vorgesehen, über welcher sich ein Staudruck einstellt, so dass die Funktion  $f_B$  in erster Linie vom Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit  $v_B$  abhängt. Zusätzlich kann  $f_B$  auch noch von linearen Termen in  $v_B$  abhängen, so dass generell gilt  $f_B(v_B) = a_1 \cdot v_B + a_2 \cdot v_B^2$ .

[0072] Fig. 5 zeigt eine Ausführung eines Massenfluss-Detektors mit linearer Response. Der Hauptkanal ist gleich aus-

gebildet wie in Fig. 4, während der Bypass keine stufenförmige Verengung aufweist, so dass gilt  $f_B(v_B) \propto v_B$ .

[0073] Zusätzlich zu den Überlegungen, die zu den Gleichungen (7) und (8) führten, können noch andere Aspekte die Wahl der Funktionen  $f_B$  und  $f_H$  bzw. der Ausgestaltung von Hauptkanal und Bypass beeinflussen. Insbesondere ist bei einem Massenfluss-Detektor der Einfluss der Gasdichte  $\rho$  zu berücksichtigen, da die gesuchte Grösse das Produkt  $\rho \cdot v_H$  ist.

[0074] Wie bereits aus Gleichung (1) folgt, misst das Sensorelement 14 das Produkt  $\rho \cdot v_B$ . Berücksichtigt man die Gasdichte, so können die Gleichungen (3) und (4) geschrieben werden als

$$\Delta p = f_B(\rho, v_B), \quad (9)$$

$$\Delta p = f_H(\rho, v_H). \quad (10)$$

[0075] Aus Gleichungen (2), (9) und (10) folgt

$$S \propto \rho \cdot v_B = \rho \cdot f_B^{-1}(\rho, f_H(\rho, v_H)). \quad (11)$$

[0076] Gewünscht ist, dass  $S$  nur vom Produkt  $\rho \cdot v_H$  abhängt. Sensoren, deren Signal  $S$  nur vom Produkt  $\rho \cdot v_H$  abhängt oder deren Antwort (ggf. nach einer geeigneten Korrektur) nur schwach (z. B. einige 10%, vorzugsweise einige Prozent) von einem solchen Verhalten abweicht, werden als Massenflusssensoren bezeichnet. Dies ist insbesondere erfüllt, wenn

$$S \propto (\rho \cdot v_H)^k, \quad (12)$$

wobei  $k$  eine beliebige Zahl ungleich Null ist. Aus (11) und (12) folgt

$$f_B^{-1}(\rho, f_H(\rho, v_H)) = \rho^{k-1} \cdot v_H^k \quad (13)$$

[0077] Liegen im Bypass lineare Strömungsverhältnisse ohne Staudruck vor, so ist der Druckabfall  $\Delta p$  unabhängig von der Dichte  $\rho$  und linear zur Geschwindigkeit  $v_B$ , d. h. die linke Seite von Gleichung (13) ist proportional zu  $f_H(\rho, v_H)$ .

[0078] Im Falle linearer Strömungsverhältnisse ohne Staudruck im Hauptkanal ist der Druckabfall  $\Delta p$  unabhängig von der Dichte  $\rho$ , d. h. es gilt

$$f_H \propto v_H = \rho^0 \cdot v_H. \quad (14)$$

[0079] Im Falle von dominantem Staudruck bzw. dominanter turbulenter Verhältnisse gilt im Hauptkanal

$$f_H \propto \rho \cdot v_H^2. \quad (15)$$

[0080] In beiden Fällen gilt also

$$f_H \propto \rho^{k-1} \cdot v_H^k. \quad (16)$$

[0081] Somit erfüllt der Massenfluss-Detektor also die Bedingung (13) sowohl für Staudruck, als auch für laminare Verhältnisse im Hauptkanal, soweit die Verhältnisse im Bypass linear sind.

[0082] Diese Bedingungen sind in der Ausführung gemäss Fig. 5 erfüllt. Sie sind auch in den Ausführungen erfüllt, die in Fig. 6 bis 8 dargestellt werden. In allen diesen Ausführungen herrschen lineare Verhältnisse im Bypass.

[0083] In Fig. 6 ist im Hauptkanal eine Lochblende 20 eingesetzt, die einen Staudruck erzeugt. Die Eintrittsmündung 12' des Bypass befindet sich vor der Blende 20, die Austrittsmündung 13' kurz bzw. unmittelbar danach. Die Anordnung nach Fig. 6 wirkt aufgrund der turbulenten Verwirbelungen ähnlich wie eine Venturi-Düse und es gilt  $\Delta p \propto \rho \cdot v_H^2$ .

[0084] In Fig. 7 ist im Hauptkanal eine Verengung 20' mit sanften Übergängen angeordnet und die Mündungen 12', 13' befinden sich vor und nach dem Engpass. Es liegen laminare Verhältnisse vor, d. h.  $\Delta p \propto v_H$ , unabhängig von  $\rho$ . Wie gestrichelt unter Position 4' angedeutet, kann der Bypass auch im Engpass angeordnet werden, so dass er von einem allfälligen Staudruck vor und nach dem Engpass nicht beeinflusst wird.

[0085] In Fig. 8 ist ein Engpass 20'' als Venturi-Düse ausgestaltet. Die Eintrittsmündung 12' des Bypass befindet sich in der Verengung, die Austrittsmündung 13' nach der Verengung. Es gilt, ohne Reibungsverluste,  $\Delta p \propto \rho \cdot v_H^2$ .

[0086] In einer derartigen Ausführung sollte die Länge  $L$  des Engpasses möglichst gross sein, damit die Reibungsverluste höher werden und die Bedingung gemäss Gleichung (7) besser erfüllt wird. Es ist auch denkbar, einen Strömungswiderstand gemäss Fig. 4 bzw. 5 in den Engpass einzubauen.

[0087] In der Anordnung nach Fig. 9 ist die Eingangsmündung 12' des Bypass als Staudüse im Hauptkanal 2, 3 angeordnet. In der Staudüse wird durch Abbremsen des Gases ein Staudruck erzeugt. Die Austrittsmündung 13' des Bypass mündet im Hauptkanal 3 oder kann auch an einen anderen Ort geführt werden, wo ein mit der Gasleitung 2 vergleichbarer statischer Druck herrscht. Der Druck  $\Delta p$  über dem Bypass wird hier in erster Linie vom Staudruck bestimmt und es gilt wiederum  $\Delta p \propto \rho \cdot v_H^2$ .

#### Sensorelement

[0088] Fig. 10 zeigt den Aufbau eines Sensorelements 14, mit welchem der Massenfluss  $\rho \cdot v_B$  eines Gases gemessen werden kann.

[0089] Das generelle Funktionsprinzip eines derartigen Bauelements ist ausführlich in "Scaling of Thermal CMOS Gas

Flow Microsensors: Experiment and Simulation" von F. Mayer et al., in Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, (IEEE, 1996), pp. 116ff beschrieben.

[0090] Das Sensorelement 14 ist auf einem Halbleitersubstrat 21 aus monokristallinem Silizium angeordnet, in welchem eine Öffnung 22 ausgeätzt wurde. Unter dem Begriff "Öffnung" ist sowohl eine einfache Vertiefung im Halbleitersubstrat 21, als auch ein sich ganz durch das Halbleitersubstrat 21 erstreckende Öffnung zu verstehen. Die Öffnung bzw. Vertiefung 22 wird von einer dünnen Membran 23 aus einem Dielektrikum abgedeckt. Auf der Membran 23 ist eine resistive Heizung 24 aus drei Widerständen angeordnet. Symmetrisch zur Heizung 24 sind zwei Thermoelemente 25, 26 vorgesehen, die als Temperatursensoren dienen. Genau genommen handelt es sich dabei um Thermosäulen bestehend aus mehreren, in Serie geschalteten Thermoelementen. Im Zusammenhang mit dieser Beschreibung und den Ansprüchen wird unter dem Ausdruck Thermoelement sowohl ein einzelnes Element als auch eine Thermosäule verstanden.

[0091] Thermoelemente haben gegenüber resistiven Temperatursensoren den Vorteil, dass sie praktisch keine Drift aufweisen und auch verhältnismässig unempfindlich gegen ein Durchbiegen der Membran 23 sind.

[0092] Die Thermoelemente 25, 26 und die Heizung 24 liegen so zur Flussrichtung 27, dass das Gas zuerst das erste Thermoelement 25, dann die Heizung 24 und schliesslich das zweite Thermoelement 26 überstreicht.

[0093] Eine typische Grösse der Membran 23 beträgt z. B.  $300 \times 500 \mu\text{m}^2$ .

[0094] Das Sensorelement 14 und insbesondere der Bereich der Membran 23, ist mit einer Passivierungsschicht 28 überdeckt. Diese kann z. B. aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid oder einem Polymer, insbesondere Polyimid, bestehen. Die Passivierungsschicht 28 verhindert Diffusion unerwünschter Moleküle, wie z. B. Wasser, in die auf dem Halbleitersubstrat 21 integrierten Komponenten.

[0095] Die Passivierungsschicht 28 hat zusätzlich auch eine mechanische Aufgabe zu erfüllen. Hierzu ist sie tensil ausgestaltet, mit einer Tensilität bei Betriebstemperatur von vorzugsweise mehr als 100 MPa. Sie ist also einer Zugspannung ausgesetzt, so dass sie die Membran 23 gestrafft und somit stabil hält. Dank dieser Stresskompensation arbeitet die Membran 23 auch bei einem Druckunterschied von mehr als 3 Bar noch einwandfrei.

[0096] Die Tensilität der Passivierungsschicht 23 kann mittels bekannter Verfahren durch geeignete Wahl der Herstellungsparameter gesteuert werden, siehe z. B. Dominik Jaeggi, "Thermal Convetes by CMOS Technology", Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule von Zürich No. 11567, 1996.

[0097] Wie bereits erwähnt, kann mit einem Sensorelement 14 gemäss Fig. 10 der Massenfluss des Gases ermittelt werden. Hierzu werden die Temperaturen über den Thermoelementen 25, 26 gemessen, welche vom Produkt der Flussgeschwindigkeit  $v_B$  und der Dichte  $\rho$  des Gases abhängen.

[0098] Das Sensorelement 14, d. h. die Heizung 24, wird gepulst betrieben, z. B. mit einer Pulslänge zwischen 5 und 50 ms. Vorzugsweise wird jedoch nicht die Zeitverzögerung zwischen dem Heizpuls und den Thermoelementensignalen gemessen, da diese nur von der Flussgeschwindigkeit und nicht vom Massenfluss abhängt. Vielmehr werden die Temperatursignale beider Thermoelemente 25, 26 miteinander verglichen, z. B. durch Bestimmung der Differenz der Signale oder des Quotienten der Signale. Diese Grösse ist in erster Linie vom Massenfluss abhängig.

[0099] Der gepulste Betrieb der Heizung hat den Vorteil, dass der Stromverbrauch reduziert wird.

[0100] Das Sensorelement 14 ist dank seinem Aufbau mechanisch robust und kann in jeder Stellung montiert werden.

[0101] Auf dem Halbleitersubstrat 21 kann weiter eine Auswerteschaltung sowie Treiberschaltungen für die Heizung 24 integriert sein. Einen möglichen Aufbau all dieser Teile auf einem gemeinsamen Substrat ist in Fig. 11 gezeigt, und ein entsprechendes Blockdiagramm in Fig. 12.

[0102] Die auf dem Halbleitersubstrat 21 zusammengefassten Komponenten sind in drei Gruppen unterteilt und umfassen einen Sensorteil 30, einen Analogteil 31 und einen Digitalteil 32. Der Sensorteil 30 enthält das oben beschriebene Sensorelement 14. Er erstreckt sich über die ganze Breite des Halbleitersubstrats 21. Da er in Kontakt mit dem zu messenden Gas kommt, sind im Sensorteil keine Schaltungselemente angeordnet. Der Analogteil 31 umfasst vorwiegend analoge Schaltungsblöcke, der Digitalteil 32 vorwiegend digitale Schaltungsblöcke. Die drei Gruppen können je auf einzelnen Halbleitersubstraten angeordnet werden, die Anordnung auf einem gemeinsamen Substrat ist jedoch aus Kostengründen und wegen der geringeren Störanfälligkeit bevorzugt.

[0103] Die Schaltungen sind in CMOS-Technik ausgeführt. Die kleinsten verwendeten Gatelängen der Transistoren, insbesondere der digitalen Schaltransistoren, sind vorzugsweise im Bereich von 0.2 bis 0.8  $\mu\text{m}$ , auf jeden Fall unterhalb 1.0  $\mu\text{m}$ .

[0104] Dank der hohen Integrationsdichte ist es möglich, sämtliche Komponenten auf einem Halbleitersubstrat 21 mit einer Fläche von z. B. nur 15  $\text{mm}^2$  unterzubringen.

[0105] Der ganze in Fig. 11 bzw. 12 gezeigte Baustein kann mit einer Spannung kleiner gleich 5.5 Volt gespeist werden, vorzugsweise mit 3 Volt.

[0106] Für den Anschluss der Versorgungsspannung und zur Kommunikation mit externen Bauteilen sind auf dem Halbleitersubstrat 21 im Bereich des Digitalteils 32 Anschlusspads 39 vorgesehen. Diese sind symmetrisch zur Längsachse 37 des Bausteins angeordnet, um asymmetrische mechanische Spannungen im Halbleitersubstrat zu vermeiden.

[0107] Die Funktionen des Analogteils 31 und des Digitalteils 32 werden weiter unten genauer beschrieben. Hier sei lediglich kurz erwähnt, dass der Analogteil 31 zur analogen Aufbearbeitung der Signale des Sensorelements 14 und zur Umwandlung in digitalisierte Daten dient. Im Digitalteil 32 findet eine Linearisierung der digitalen Daten statt. Ausserdem erzeugt der Digitalteil die Taktsignale der einzelnen Bauteile, und er weist einen Speicher auf, in welchem Eich- und Betriebsparameter und/oder Linearisierungskoeffizienten gespeichert werden können.

[0108] Jede der Gruppen 30, 31 und 32 ist von einer "Scribe Line" 33 eingefasst. Zudem ist eine Scribe Line 33' um die Membran 23 des Sensorelements 14 angeordnet.

[0109] Der Aufbau einer derartigen Scribe Line ist in Fig. 13 dargestellt. Generell besteht sie aus einer Stelle, an welcher die gut diffusionsfähigen, inneren Beschichtungen des Substrats 21 unterbrochen werden und mindestens eine der Metallschichten direkt auf das Substrat 21 abgesenkt wird. Im gezeigten Ausführungsbeispiel sind auf dem Substrat 21 z. B. eine erste  $\text{SiO}_2$ -Schicht 41, eine Polysiliziumschicht 42, eine erste Glasschicht 43, eine erste Aluminiumschicht 44, eine zweite Glasschicht 45, eine zweite Aluminiumschicht 46 und die Passivierungsschicht 28 angeordnet. Im Bereich



der Scribe Line 33, 33' sind die erste  $\text{SiO}_2$ -Schicht 41, die Polysiliziumschicht 42, die erste Glasschicht 43 und die zweite Glasschicht 45 unterbrochen, während die beiden Aluminiumschichten 44, 46 und die Passivierungsschicht 28 durchgeführt sind.

[0110] Generell werden mit Ausnahme der obersten Passivierungsschichten in der Regel alle dielektrischen Schichten unterbrochen, da diese für Ionen und Fremdmoleküle gut durchlässig sind, während zumindest eine Metall- oder Halbleiterschicht als Barriere weitergeführt wird.

[0111] Durch die Verwendung der Scribe Lines 33 werden die einzelnen Gruppen des Bausteins voneinander abgetrennt. Dank der Scribe Line 33' um die Membran 23 werden Ionen und Fremdmoleküle, die in diesem Bereich besonders gut in die Schichten eindringen können, daran gehindert, weiter zu diffundieren. Dadurch werden Alterungsprozesse reduziert oder sogar vermieden.

[0112] Ebenfalls zur Vermeidung elektrischer Störungen werden Leitungen, die schwache analoge Signale oder hochfrequente Signale tragen, mit einer speziellen Anordnung abgeschirmt, die in Fig. 14 dargestellt ist. Dies gilt insbesondere für die langen Leitungen 35, die die Thermoelemente 25, 26 mit dem Analogteil 31 verbinden.

[0113] Hierzu werden die abzuschirmenden Leitungen 35 auf einer isolierenden  $\text{SiO}_2$ -Schicht 41 angeordnet und mit einer weiteren  $\text{SiO}_2$ -Schicht 45 seitlich und nach oben isoliert. Im Substrat 21 unterhalb der Leitungen 35 ist ein leitender p+- oder n+-Diffusionsbereich 48 vorgesehen. Über der oberen  $\text{SiO}_2$ -Schicht 45 ist eine leitende Deckschicht 46 aus Aluminium vorgesehen, die seitlich entlang der Leitungen 35 mit dem p+- bzw. n+-Diffusionsbereich 48 in Kontakt steht.

[0114] Die Leitungen 35 können z. B. aus Aluminium oder Polysilizium sein, ebenso kann anstelle der Aluminiumschicht 46 ein anderes leitendes Material verwendet werden. Anstelle der  $\text{SiO}_2$ -Schichten 41, 45 können auch andere Schichten aus elektrisch isolierendem Material, z. B. Glas oder Siliziumnitrid verwendet werden. Je nach Bedarf kann auch nur eine Leitung 35 in dieser Weise abgeschirmt werden, oder es können mehr als zwei Leitungen gemeinsam abgeschirmt werden. Dabei bilden die leitende Deckschicht 46 und die Diffusionsschicht 48 einen Schirm für die abzuschirmenden Leitungen.

[0115] Die Passivierungsschicht ist in Fig. 14 nicht dargestellt.

[0116] Anstelle der oder zusätzlich zu den Leitungen 35 können auch andere Leitungen des Halbleiterbausteins in dieser Weise abgeschirmt werden, z. B. die Leitungen 36, die die Heizung mit dem Analogteil verbinden. Es kann auch sinnvoll sein, Leitungen für digitale Signale in dieser Weise abzuschirmen, insbesondere wenn es sich um Digitalsignale hoher Frequenz handelt, die andere Komponenten der Schaltung stören könnten.

[0117] Eine Abschirmung der Art von Fig. 14 kann überall dort eingesetzt werden, wo Leitungen abgeschirmt werden müssen. Besonders eignet sie sich für Halbleiterbausteine, auf denen ein Sensor und ein Verstärker oder eine Auswerteschaltung angeordnet sind.

[0118] Eine weitere Reduktion von Störungen wird erreicht, indem Schleifen in den Verbindungsleitungen zwischen dem Sensorteil 30 und dem Analogteil 31 vermieden werden. So werden die Verbindungsleitungen 35 zwischen den Thermoelementen 25, 26 und dem Analogteil unmittelbar nebeneinander und parallel zueinander geführt, wie dies insbesondere auch aus Fig. 14 für die beiden Leitungen 35 eines der Thermoelemente ersichtlich ist.

[0119] Ebenfalls eine Reduktion von Störungen wird durch die Geometrie der Anordnung der Bauteile auf dem Halbleitersubstrat erzielt. Der Analogteil 31 ist zwischen dem Sensorelement 14 und dem Digitalteil 32 angeordnet, damit die schwachen Sensorsignale von den Schaltsignalen des Digitalteils möglichst wenig beeinflusst werden.

[0120] Weiter ist das Sensorelement an einem Ende des Halbleitersubstrats angeordnet, so dass die übrigen Teile des Halbleitersubstrats mit dem zu messenden Gas nicht in Kontakt treten können.

[0121] Wie aus Fig. 11 ersichtlich, ist das Sensorelement 14 im wesentlichen symmetrisch zu einer mittleren Längsachse 37 des Halbleiterbausteins angeordnet.

[0122] Insbesondere liegt die Heizung 24 symmetrisch zu dieser Achse, so dass thermisch induzierte Spannungen im Substrat gering bleiben. Wie im folgenden genauer beschrieben, besitzt der Analogteil 31 zwei differenziell betriebene Kanäle zur Auswertung der Messsignale. Damit diese Kanäle von dem Temperaturgradienten, der von der Heizung 24 im Substrat 21 erzeugt wird, in gleicher Weise beeinflusst werden, sind deren Bauteile möglichst in Bereichen gleicher Temperatur angeordnet.

[0123] Das Sensorelement 14 erstreckt sich nicht über die ganze Breite des Halbleitersubstrats. In Flussrichtung des Gases vor und hinter dem Sensorelement 14 sind Abstandsbereiche 38 vorgesehen, die dafür sorgen, dass das Gas beim Sensorelement 14 ein möglichst laminares, ungestörtes Strömungsfeld besitzt.

[0124] Im folgenden wird die Funktionsweise des Analogteils 31 und des Digitalteils 32 näher erläutert.

#### Analogteil

[0125] Wie in Fig. 12 gezeigt, umfasst der Analogteil eine Heizungssteuerung 50, einen als MUX/Verstärker bezeichneten Teil 51 zum Auswählen der zu verarbeitenden Signale und zu deren Vorverstärkung, und einen A/D-Wandler 52.

[0126] Ferner umfasst der Analogteil 31 auch einen Temperatursensor 40 zum Messen der Umgebungs- und/oder Substrattemperatur. Diese Temperatur kann die Signale der Thermoelemente 25, 26 beeinflussen und wird deshalb bei deren Aufbereitung berücksichtigt. Der Temperatursensor 40 kann auch im Sensorteil 30, insbesondere auf der Membran 23, angeordnet sein.

[0127] Dem Temperatursensor 40 ist ein eigener A/D-Wandler 40a zugeordnet, der mit geringerer Taktrate arbeitet als der A/D-Wandler 52, wodurch der Stromverbrauch reduziert wird. Zwischen dem Temperatursensor 40 und dem A/D-Wandler 40a kann zusätzlich ein Verstärker mit einstellbarem Offset und Gain angeordnet sein.

[0128] Der Analogteil 31 erfüllt also vielfältige Aufgaben und umfasst mindestens 100 Transistoren. Die Komponenten des Analogteils werden nun im einzelnen beschrieben.



## Heizungssteuerung

[0129] Die Heizungssteuerung 50 ist in Fig. 15 dargestellt. Sie besitzt einen Operationsverstärker 55, an dessen positivem Eingang eine Festspannung Vbg anliegt. Diese Festspannung wird von einem Spannungsgenerator 53 erzeugt. Der Spannungsgenerator 53 ist auf dem Halbleitersubstrat 21 integriert und erzeugt seine Spannung aus der Bandgap-Spannung Vbg des Halbleiters. Für Silizium beträgt diese Spannung ca. 1.2 V.

[0130] Am Ausgang des Operationsverstärkers 55 liegt die Heizung 24, die, wie auch in Fig. 11 gezeigt, in drei Teilwiderstände R1a, R1b und R1c aufgeteilt ist. Jeder dieser Widerstände ist als Leiterbahn ausgestaltet, die sich über die Membran 23 erstreckt, wobei die drei Leiterbahnen an einem Ende miteinander verbunden sind. Am anderen Ende sind die beiden äusseren Leiterbahnen, die z. B. die Widerstände R1b und R1c bilden, ebenfalls miteinander und mit dem Analogteil 31 verbunden, während die mittlere Leiterbahn, welche in diesem Falle R1a bildet, individuell mit dem Analogteil 31 verknüpft ist. Somit liegen die Widerstände R1b und R1c parallel zueinander, und das Widerstandspaar R1b und R1c liegt im Serie zum Widerstand R1a, wie dies in Fig. 15 gezeigt wird.

[0131] Der gemeinsame Anschlusspunkt aller Widerstände ist mit dem invertierenden Eingang des Operationsverstärkers 55 verbunden, die gemeinsamen Anschlüsse von R1b, R1c liegen auf 0 Volt, der einzelne Anschluss von R1a am Ausgang des Operationsverstärkers 55. Somit hält die Heizsteuerung die Spannung über R1b, R1c also konstant, unabhängig vom Wert der Versorgungsspannung. Auch die Spannung über R1a wird auf diese Weise im wesentlichen konstant gehalten, da der totale Strom durch R1b, R1c gleich ist wie jener durch R1a.

[0132] Ein Vorteil der Aufspaltung der Heizung 24 in mehrere Widerstände, die als parallele, nebeneinander liegende Leiterbahnen die Membran 23 überqueren, liegt darin, dass die stromführenden Leitungen 36 von der Heizungssteuerung beide an der gleichen Seite der Membran 23 angreifen können.

[0133] Ausserdem benötigt die Schaltung nach Fig. 15 nebst den Widerständen R1a, R1b, R1c der Heizung 24 keine weiteren Widerstände und vermeidet somit unnötige Verlustleistungen.

[0134] Die Widerstände R1a, R1b, R1c sind vorzugsweise alle gleich gross und liegen im Bereich von 0.8 bis 250 k $\Omega$ , so dass bei einer Spannung von ca. 2 bis 5 Volt eine Leistung zwischen 0.1 und 5 mW erzeugt werden kann. Insbesondere der Wert des Widerstands R1a kann jedoch auch ungleich jenem von R1b und R1c gewählt werden, ohne dass die Symmetrie der Heizung beeinträchtigt wird.

[0135] In der Ausführung nach Fig. 15 ist die Heizung also in zwei zueinander in Serie liegende Widerstandsgruppen aufgeteilt, wobei die erste Widerstandsgruppe R1b und R1c umfasst und die zweite R1a. Je nach Verhältnis der gewünschten Ausgangsspannung des Operationsverstärkers 55 (welche für einen minimalen Leitungsverlust möglichst nahe bei der positiven Versorgungsspannung liegen sollte) und der konstanten Spannung Vbg kann die Grösse der beiden Widerstandsgruppen entsprechend angepasst werden. Beispielsweise könnte z. B. jede Widerstandsgruppe auch nur genau einen Widerstand umfassen.

[0136] Die Heizleistung  $P_H$  der Heizung 24 ist gegeben durch

$$P_H = U_H^2 / R_H,$$

wobei  $U_H$  die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers 55 und  $R_H$  der effektive Widerstand der Kombination von R1a, R1b und R1c. Die Widerstände R1a, R1b und R1c werden als PTC-Widerstände mit zunehmender Temperatur grösser, im wesentlichen proportional zum Temperaturanstieg. Ein Temperaturanstieg der Heizung führt also sofort zu einer Reduktion der Heizleistung. Indem die Spannung über der Heizung bzw. einem Teil der Widerstände konstant gehalten wird, wird also im wesentlichen auch die Temperatur der Heizung konstant gehalten.

[0137] Anstelle der Schaltung gemäss Fig. 15 kann jedoch z. B. auch eine Schaltung eingesetzt werden, welche die Temperatur, den Strom oder die Leistung der Heizung konstant hält. In einer einfachsten Ausführung kann die Heizung auch direkt an die (externe) Versorgungsspannung angehängt werden.

## MUX/Verstärker

[0138] Der als MUX/Verstärker bezeichnete Teil 51 ist als Blockdiagramm in Fig. 16 dargestellt. Seine Aufgabe besteht darin, die Eingangssignale für den A/D-Wandler 52 bereitzustellen. Letzterer besitzt zwei Eingangspaare VIN, NVIN und VREF, NVREF, wobei er im wesentlichen die Differenz oder die Summe von VIN und NVIN in Einheiten der Differenz oder Summe von VREF und NVREF bestimmt. Nähere Angaben zum Aufbau des AD-Wandlers 52 sind weiter unten gegeben.

[0139] Teil 51 umfasst einen Multiplexer 57 und zwei mehrstufige, symmetrische Zweikanalverstärker A1, A2. Insbesondere Verstärker A2 ist optional und kann auch durch einfache Verbindungsleitungen ersetzt werden.

[0140] Der Multiplexer 57 besitzt die folgenden Eingänge: Je zwei Eingänge TP1 und NTP1 bzw. TP2 und NTP2 für die Thermoelemente 25, 26, einen Eingang für eine analoge Masse A\_GND, einen Eingang für die Speisespannung Vdd, einen Eingang für eine interne Referenzspannung Vrefint (abgeleitet aus der oben erwähnten Bandgap-Spannung Vbg) und einen Eingang für eine externe Referenzspannung Vrefext. Er besitzt verschiedene Zustände, in denen jeweils gewisse der Eingänge mit den Ausgängen M1a, M1b und M2a, M2b verbunden werden:

Zustand	Spannung an M1a, M1b	Spannung an M2a, M2b	
1	(TP1-NTP1), - (TP2-NTP2)	Vrefint	
2	(TP1-NTP1), - (TP2-NTP2)	Vrefext	5
3	(TP1-NTP1), (TP2-NTP2)	Vrefint	
4	(TP1-NTP1), (TP2-NTP2)	Vrefext	
5	(TP1-NTP1), - (TP2-NTP2)	(TP1-NTP1), - (TP2-NTP2)	10
6	0	Vrefint	
7	0	Vrefext	
8	$k \cdot V_{dd}$ ( $k < 1$ )	Vrefint	15

[0141] In den Zuständen 1 und 2 wird vom A/D-Wandler 52 die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Thermoelementen 25, 26 in Einheiten von Vrefint bzw. Vrefext gemessen. In den Zuständen 3 und 4 wird die Summe der Temperaturen über den beiden Thermoelementen 25, 26 in Einheiten von Vrefint bzw. Vrefext gemessen. Dieser Wert kann, wie weiter unten beschrieben, in einem Selbsttest verwendet werden. 20

[0142] In Zustand 5 wird die Temperaturdifferenz in Einheiten der Summe der Temperaturen der Thermoelemente gemessen (siehe unten) – es zeigt sich, dass diese Grösse in gewissen Fällen geringere Abhängigkeit von der Membrandicke und somit von der Verschmutzung aufweist als die reine Temperaturdifferenz. In den Zuständen 6 und 7 kann ein Offsetabgleich durchgeführt werden. Zustand 8 wird bei einer Überprüfung der Versorgungsspannung Vdd verwendet, wobei dem A/D-Wandler ein bekannter Bruchteil  $k$  der Versorgungsspannung Vdd zugeführt wird. 25

[0143] In den Zuständen 1, 2 und 5 sind die Eingänge NTP1 und NTP2 auf analoge Masse gelegt und TP1 und TP2 mit den Ausgängen verbunden. In den Zuständen 3 und 4 sind die Eingänge NTP1 und TP2 auf analoge Masse gelegt und TP1 und NTP2 sind mit den Ausgängen verbunden.

[0144] Der Zweikanalverstärker A1 (und, soweit vorgesehen, auch der Zweikanalverstärker A2) ist vorzugsweise mehrstufig aufgebaut, so wie dies in Fig. 17 dargestellt ist. Jede Stufe besitzt eine Verstärkerstufe A11, A12, A13, A14, die über Schalter S11, S12, S13, S14 wahlweise zugeschaltet oder überbrückt werden kann. Der Verstärkungsfaktor jeder Stufe ist z. B. 5, so dass die gesamte Verstärkung zwischen 1 und  $5^4 = 625$  liegen kann. 30

[0145] Die Verwendung mehrerer Verstärkerstufen A1i hat den Vorteil, dass auch bei geringem Stromverbrauch auch noch hohe Frequenzen verstärkt werden können. Ein einzelner Verstärker mit grosser Verstärkung würde bei gleicher Frequenz einen höheren Stromverbrauch aufweisen. 35

[0146] Eine einzelne Verstärkerstufe A1i ist in Fig. 18 dargestellt. Es handelt sich hier um einen Verstärker mit geschalteten Kapazitäten. Er besitzt eine invertierende Zweikanal-Verstärkerschaltung 59 und Schalter K1i, K2i in konventioneller Ausführung. Die Schaltung arbeitet im "Auto-Zeroing"-Modus, d. h. bei geschlossenen Schaltern K1i in der Rückkopplungsschleife sind die eingangsseitigen Schalter K1i auf Masse, so dass auf den Kondensatoren C1i eine dem Offset entsprechende Ladung abgespeichert wird, die in der nächsten Halbtaktphase vom eigentlichen Signal subtrahiert wird. 40

[0147] Damit die Verstärkerstufen gemäss Fig. 18 kaskadiert werden können, müssen die Schalter K1i, K2i aufeinander folgender Stufen um  $180^\circ$  phasenverschoben getaktet werden. 45

#### A/D-Wandler

[0148] Der Aufbau des A/D-Wandlers 52 wird in Fig. 19 dargestellt. Er ist als Sigma-Delta-Konverter ausgestaltet und besitzt einen Verstärker 60 und einen Komparator 61. Der Ausgang des Komparators wird in bekannter Weise einem Zähler 62 und einer Schaltersteuerung 63 zugeführt. 50

[0149] Die Eingangskondensatoren Cx1, Cx2, Cy1, Cy2 sind über Eingangsschalter X1, X2, Y1, Y2 mit den zu Fig. 16 beschriebenen Eingängen VREF, NVREF, VIN, UVIN verbunden.

[0150] Durch geeignete Wahl der Lage der Schaltphasen der Schalter X1 und X2 bzw. Y1 und Y2 kann ausgewählt werden, ob die an den Eingängen VREF, NVREF bzw. VIN, NVIN anliegenden Spannungen voneinander subtrahiert oder zueinander addiert werden. 55

[0151] Der A/D-Wandler 52 ist auf jener Seite des Analogteils 31 angeordnet, die dem Digitalteil 32 am nächsten ist, da der A/D-Wandler weniger empfindlich gegen Störungen ist als z. B. die Verstärker A1, A2 oder andere Teile des Analogteils 31. 60

#### Buffer

[0152] Die Signale vom Analogteil 31 zum Digitalteil 32 und jene vom Digitalteil 32 zum Analogteil 31 werden gepuffert. Hierzu ist für jedes Signal ein Buffer 64 vorgesehen, wie er in Fig. 20 dargestellt ist.

[0153] Der Buffer 64 nach Fig. 20 übermittelt ein Signal vom Analogteil 31 zum Digitalteil 32. Als Versorgungsspannung wird ihm die positive Versorgungsspannung Vpp des Digitalteils 32 zugeführt. 65

[0154] Ein Buffer für Signale vom Digitalteil 32 zum Analogteil 31 wird umgekehrt von der positiven Versorgungsspannung Vdd des Analogteils 31 gespeist.

[0155] Durch die Verwendung von Buffern 64 wird die Übertragung hochfrequenter Störsignale vom Digitalteil 32 in

den Analogteil 31 reduziert.

[0156] Um ein Übersprechen von Störungen zu vermeiden, werden Analogteil 31 und Digitalteil 32 von getrennten Spannungen Vdd bzw. Vpp versorgt, für die auf dem Halbleitersubstrat 21 vorzugsweise auch getrennte Anschluss pads 39 vorgesehen sind.

5 [0157] Auch die Massen des Analogteils 31 und des Digitalteils 32 werden vorzugsweise voneinander getrennt aus dem Chip geführt. Es wird insbesondere zwischen stromführender Masse, wie z. B. Source-Kontakte von NMOS-Transistoren, und stromloser Masse, wie z. B. die Backgates der NMOS-Transistoren, unterschieden um das Rauschen zu minimieren.

10

## Digitalteil

[0158] Ein Blockschaltbild des Digitalteils ist in Fig. 21 dargestellt, wobei die Buffer 64 nicht gezeigt werden.

[0159] Die digitalisierten Werte vom A/D-Wandler 52 gelangen zu einer Signalverarbeitungsschaltung 70. Diese Schaltung führt die folgenden Operationen durch:

15

- Sie subtrahiert ein in einer Kalibrierung ermitteltes Offset-Signal.
- Sie prüft die Werte der digitalisierten Signale und steuert die Verstärkung der Verstärker A1 bzw. A2, so dass immer mit optimaler Auflösung gemessen wird. Sind die Signale vom A/D-Wandler sehr gross, so wird die Verstärkung reduziert, sind sie sehr klein, so wird die Verstärkung vergrössert.
- 20 - Sie führt eine Kalibrierung und Linearisierung durch, bei der die Werte vom A/D-Wandler 52 nichtlinear gemittelt werden. Ein entsprechendes Verfahren ist z. B. von P. Malcovati et al. in IEEE Journal of Solid-State Circuits, pp. 963ff, Bd. 29, 1994 beschrieben worden.

20

[0160] Für die Kalibrierung und Linearisierung greift die Signalverarbeitungsschaltung 70 über ein serielles Interface 71 auf ein externes EEPROM 72 zu, in welchem Koeffizienten für die Aufbereitung der Daten abgespeichert sind.

[0161] Um die Zahl der Zugriffe auf das externe EEPROM 72 zu reduzieren, ist im Digitalteil 32 ferner ein Zwischenspeicher 72a vorgesehen, in welchem mindestens einer, vorzugsweise mehrere, der zuletzt aus dem EEPROM 72 ausgelesenen Werte und die zugehörige Adresse abgespeichert sind. Soll einer dieser Werte nochmals ausgelesen werden, so wird auf den Zwischenspeicher 72a und nicht auf das EEPROM 72 zugegriffen. Dadurch wird der Stromverbrauch reduziert und es werden weniger Störsignale erzeugt, da die Signalverarbeitungsschaltung nicht auf das externe EEPROM 72 zugreifen muss, wenn sich die Signale vom A/D-Wandler 52 nicht oder nur geringfügig ändern.

[0162] Die für die Linearisierung zu verwendenden Koeffizienten hängen vom Verstärkungsfaktor der Verstärker A1 bzw. A2 ab und werden entsprechend der momentanen Einstellung der Verstärker automatisch in richtiger Weise ausgewählt.

35 [0163] Wie bereits erwähnt, hängen die Messwerte der Thermoelemente 25, 26 auch von der Temperatur des Substrats bzw. der Umgebung und des Gases ab. Deshalb wird der vom Temperatursensor 40 gemessene Wert bei der Linearisierung ebenfalls berücksichtigt, um die Temperaturabhängigkeit der Daten der Thermoelemente 25, 26 zu reduzieren bzw. zu kompensieren. Im EEPROM 72 ist ein zweidimensionales Array von Koeffizienten abgespeichert, welche über die Temperaturdifferenz der Thermoelemente und den momentanen Wert des Temperatursensors 40 adressiert werden.

40 [0164] Die Ausgangsdaten des Massenflussdetektors werden von der Signalverarbeitung 70 ebenfalls dem seriellen Interface 71 zugeführt und können dort von einem externen Mikrocontroller 73 abgefragt werden.

[0165] Im Digitalteil 32 ist ferner ein nicht flüchtiger Speicher 74 vorgesehen. In der vorliegenden Ausführung ist dieser Speicher als ROM ausgestaltet, der normalerweise herstellenseitig programmiert wird und die Funktionsweise des Massenflussdetektors 4 festlegt. Vorzugsweise ist er in "Zener Zaps"-Bauweise aufgebaut mit Dioden, die zur Programmierung durchgebrannt werden. Es ist auch denkbar, den Speicher 74 z. B. als Flash-ROM oder als EEPROM auszugestalten.

45 [0166] Der Speicher 74 umfasst mindestens 20 Bits Speicherplatz und legt z. B. die folgenden Optionen fest:

- Aktivierung der Linearisierung in der Signalverarbeitungsschaltung 70: Die Linearisierung kann ausgeschaltet werden, wenn sie nicht benötigt oder extern durchgeführt wird.
- Aktivierung der Offsetkorrektur: Die obenerwähnte Offsetkorrektur kann wahlweise ein- und ausgeschaltet werden.
- Aktivierung der Gainumschaltung: Wie oben erwähnt, kann die Signalverarbeitungsschaltung 70 die Verstärkung der Verstärker A1, A2 automatisch nachführen. Diese Möglichkeit kann ausgeschaltet werden.
- 55 - Heizmodus: Die Heizung kann wahlweise mit der in Fig. 15 dargestellten Schaltung oder von einer externen Spannungsquelle gespeist werden.
- Taktrate: Damit der Chip mit unterschiedlichen Taktraten betrieben werden kann, ist im Speicher 74 ein Teiler abgespeichert, durch welchen der angelegte Clock dividiert wird.
- Seriennummer: Im Speicher 74 ist eine Seriennummer abgespeichert.

60

[0167] Ferner können mit dem Speicher 74 weitere optionale Fähigkeiten des Halbleiterbausteins ein- und ausgeschaltet werden.

[0168] Der Speicher 74 ist physikalisch auf derjenigen Seite des Digitalteils 32 angeordnet, die dem Analogteil 31 am nächsten ist, da der Speicher 74 relativ geringe Störsignale erzeugt.

65 [0169] Schliesslich ist im Digitalteil 32 auch eine Steuerung mit Taktgeber 75 angeordnet. Diese erzeugt alle Steuersignale für den Digitalteil 72 und auch die Steuerbefehle für die Schalter des Analogteils 31.

[0170] Fig. 23 zeigt schematisch den Aufbau des Taktgebers 75. Er besitzt einen Takteingang T, welcher ein Taktsignal trägt, das auf dem Halbleitersubstrat oder extern erzeugt wird. Dieses Taktsignal wird einer Zeitverzögerungsschaltung

75a zugeführt, die zwei zeitverschobene Taktsignale T1, T2 erzeugt. Wie aus Fig. 24 ersichtlich, sind diese Signale (bzw. deren aktive Flanken) um einen Zeitwert  $\Delta t$  gegeneinander verschoben. Das frühere Taktsignal T1 wird einem Taktgenerator 75b für den Digitalteil und das spätere Taktsignal T2 einem Taktgenerator 75c für den Analogteil zugeführt. Der Taktgenerator 75b erzeugt alle Taktsignale für die Komponenten des Digitalteils 32. Der Taktgenerator 75c erzeugt alle Taktsignale für den Analogteil 31. Der Wert  $\Delta t$  ist so gross gewählt, dass innerhalb der Zeit  $\Delta t$  alle Komponenten des Digitalteils 32 geschaltet haben. Damit wird sichergestellt, dass die Komponenten des Analogteils 31 erst dann zu schalten beginnen, wenn die Umschaltvorgänge im Digitalteil 32 beendet sind, wodurch eine Reduktion der Störungen im Analogteil 31 erzielt werden kann.

[0171] Insgesamt umfasst der Digitalteil 32 mindestens 1000 Gatter, um seine Aufgaben zu erfüllen.

#### Steuerteil

[0172] Der Steuerteil 5 des Geräts, der ebenfalls in Fig. 21 dargestellt ist, umfasst den Mikrocontroller 73 und das EEPROM 72, wobei er letzteres mit dem Digitalteil 32 des Massenflussdetektors 4 teilt.

[0173] Der Mikrocontroller 73 kann z. B. ein Microprozessor mit integriertem ROM sein. Er kann über das serielle Interface 71 des Digitalteils auch auf das EEPROM 72 zugreifen, um dort akkumulierte Gebühren abzuspeichern. Ferner steuert der Mikrocontroller 73 die auf der optionalen Anzeige 6 darzustellenden Daten und den optionalen Kartenleser 7.

[0174] Es kann ausserdem auch ein Radio-Interface 76 vorgesehen sein, über welches der Mikrocontroller 73 z. B. über ein zelluläres Telefonnetz beispielsweise mittels GSM mit einer Zentrale 84 kommunizieren kann. So kann der Gaszähler z. B. den Gasverbrauch automatisch an die Zentrale 84 weiterleiten. Es ist auch denkbar, dass die Zentrale 84 einen Tarifsatz, nach welchem der Gasverbrauch zu berechnen ist, per Funk an den Gaszähler übermittelt.

[0175] Anstelle des oder zusätzlich zum Radio-Interface 76 kann ein weiteres Interface 77 vorgesehen sein. Dabei kann es sich um ein drahtloses oder drahtgebundenes Interface handeln, welches z. B. für das lokale Auslesen des Gaszählers verwendet werden kann.

[0176] Der Mikrocontroller 73 steuert auch das Ventil 8.

[0177] Der Steuerteil kann weiter eine elektronische Uhr 78 aufweisen. Diese kann z. B. verwendet werden, um zeitabhängige Tarifsätze zu verarbeiten.

[0178] Der Steuerteil liest den momentanen Massenfluss im Bypass 10, wie er vom Massenflussdetektor 4 bestimmt wird, über das serielle Interface 71 aus und integriert diesen Wert über die Zeit. Ausserdem rechnet er den Massenfluss im Bypass 10 auf den Massenfluss im Hauptkanal 2, 3 um. In regelmässigen Zeitabständen, z. B. immer wenn eine bestimmte Menge an Gas verbraucht wurde, oder wenn Gas für eine bestimmte Gebührenmenge konsumiert wurde, speichert er den entsprechenden Zwischenwert im EEPROM 72 ab, so dass eine Störung oder ein Wegfall der Stromversorgung zu keinem Datenverlust führt.

[0179] Es ist auch möglich, die Versorgungsspannung zu überwachen. Sobald diese abzufallen beginnt, wird noch der letzte Zwischenwert ins EEPROM geschrieben. In diesem Fall muss durch einen entsprechenden Puffer sichergestellt werden, dass bei einem plötzlichen Spannungsabfall noch genügend Zeit zum Sichern der Daten bleibt.

[0180] Da der Steuerteil 5 also den Massenfluss des konsumierten Gases über die Zeit integriert, berechnet er die Masse des verbrauchten Gases. Aus dieser Masse wird eine entsprechende Gebühr berechnet, was entweder ebenfalls im Steuerteil 5 oder extern geschehen kann.

[0181] Der Steuerteil 5 zeigt die verbrauchte Gasmenge (oder eine entsprechenden Gebühr) als Wert auf der Anzeige 6 an. Dieser Wert kann verschlüsselt sein, so dass die Gefahr einer Manipulation geringer ist.

[0182] Ist ein Lesegerät 7 vorgesehen, so kann der Benutzer in dieses Gerät eine Wertkarte 80 einführen. Diese Karte enthält einen nicht-flüchtigen Speicher 82 mit einer Gutschrift für eine bestimmte Gasmasse. Der Mikrocontroller 73 öffnet das Ventil erst, wenn eine derartige Wertkarte 80 in den Kartenleser 7 eingeführt wird, und führt die Gutschrift im Speicher 82 entsprechend der konsumierten Gasmasse nach. So kann er z. B. nach Einschieben der Karte eine Gebühren- oder Mengeneinheit vom Wert im Speicher 82 subtrahieren und sodann das Ventil solange offen halten, bis eine entsprechende Gasmenge verbraucht wurde. Sodann subtrahiert er eine nächste Gebühren- bzw. Mengeneinheit vom Wert im Speicher 82, usw. Sobald eine derartige Subtraktion nicht mehr möglich ist, wird das Ventil 8 geschlossen.

[0183] Ist ein Radio-Interface 76 vorgesehen, so können die Gaskosten bzw. die konsumierte Gasmasse bzw. über das Radio-Interface 76 einer Zentrale 84 übermittelt werden.

[0184] Der Digitalteil 32 kann unabhängig vom Mikrocontroller 73 arbeiten, d. h. er kann die Kalibrierung und Linearisierung der Messdaten ohne Hilfe des Mikrocontrollers 73 durchführen. Der Mikrocontroller 73 braucht lediglich die Resultate vom Digitalteil 32 abzufragen. Dies erlaubt es, den Mikrocontroller 73 nur intermittierend und/oder bei reduzierter Taktrate zu betreiben. Dadurch wird der Stromverbrauch des Gaszählers reduziert. Ausserdem können Störungen, die vom Mikrocontroller 73 erzeugt werden, kaum bis in den Analogteil 31 gelangen.

[0185] Die auf dem Halbleitersubstrat 21 angeordneten Komponenten müssen nicht dauernd in Betrieb sein. Sie können vom Mikrocontroller 73 z. B. nur periodisch eingeschaltet werden, um in regelmässigen Abständen Messungen durchzuführen. Dies führt zu einer Reduktion des Stromverbrauchs. So können z. B. Messungen nur alle 2 Sekunden durchgeführt werden.

[0186] Der Mikrocontroller 73 kann auch die Genauigkeit der Messungen bestimmen, indem er die Anzahl der vom Digitalteil 32 durchgeführten Mittelungen oder die Pulslänge der Heizpulse festlegt. Zur Reduktion des Stromverbrauchs kann z. B. zuerst eine Messung hoher Genauigkeit durchgeführt werden, und dann Messungen geringerer Genauigkeit, bis letztere anzeigen, dass sich der Massenfluss offenbar geändert hat. Dann ist wieder eine Messung hoher Genauigkeit durchzuführen.

[0187] Die auf dem Halbleitersubstrat angeordneten Komponenten können im Dauerbetrieb oder im intermittierenden Betrieb arbeiten, wobei der entsprechende Betriebsmodus vom Mikrocontroller 73 angewählt und vom Digitalteil 32 gesteuert wird.

[0188] Im intermittierenden Betrieb laufen bei einer Aktivierung des Halbleiterchips durch den Mikrocontroller 73 die

folgenden Schritte ab:

A) Die Heizung und die Messelektronik werden eingeschaltet.

B) Nach Schritt A wartet der Digitalteil 32, bis sich die Heizungstemperatur stabilisiert hat. Dann führt er zuerst eine Offsetkorrektur und sodann eine Messung durch. Die Daten werden ausgegeben.

C) Sodann werden die Messelektronik und die Heizung ausgeschaltet und der Halbleiterchip wartet auf die nächste Aktivierung durch den Mikrocontroller.

[0189] Im Dauerbetrieb werden ohne Unterbruch Messzyklen durchgeführt, wobei in jedem Messzyklus zuerst eine Offsetkorrektur und sodann eine Messung stattfindet.

#### Seriell Interface

[0190] Das serielle Interface 71 arbeitet nach einem in Fig. 22 dargestellten Protokoll. Will der Mikrocontroller 73 Daten aus dem Digitalteil 32 auslesen, so bringt er zuerst eine "Chip Select"-CS-Leitung in den aktiven Zustand 0 und wählt damit den Digitalteil 32 an. Darauf hin gibt der Digitalteil 32 an einer Datenleitung D ein "Ready"-Signal R ab. Dieses ist 0, solange die momentan laufende Messung noch im Gang ist. Sobald die Messung abgeschlossen ist, setzt der Digitalteil 32 die Datenleitung D, d. h. das "Ready"-Signal R, auf 1. Dies zeigt dem Mikrocontroller 73 an, dass er nun mit dem Auslesen der Daten beginnen kann. Hierzu beginnt er, ein bislang auf 1 gesetztes Clocksignal Clk zu takten. Mit der ersten negativen Flanke stellt der Digitalteil 32 das erste Datenbit D0 bereit, so dass dieses vom Mikrocontroller 73 an der nächsten positiven Flanke ausgelesen werden kann. Sodann wird das zweite Datenbit D1 bereitgestellt, usw., bis zum letzten Datenbit Dn.

[0191] Das in Fig. 22 gezeigte Protokoll hat den Vorteil, dass ohne zusätzliche Leitungen und in für bestehende serielle Protokolle transparenter Weise der Status der Messung berücksichtigt werden kann. Dies wird dadurch erreicht, indem auf der Datenleitung D ein Zustandssignal ("Ready"-Signal R) abgegeben wird, wenn der Chip durch das CS-Signal ausgewählt wird, wobei das Zustandssignal von einem inaktiven (hier 0) auf einen aktiven (hier 1) Zustand wechselt, sobald der Chip bereit ist. Sodann erzeugt der Mikrocontroller das Clocksignal Clk, dessen erste Flanke dem Digitalteil 32 anzeigt, dass er nun das erste Datenbit D0 auszugeben hat. Er ersetzt das Zustandssignal durch das erste Datenbit D0, so dass dieses beim nächsten Wechsel des Taktsignals Clk gültig ist.

[0192] Das Protokoll gemäss Fig. 22 bzw. das entsprechende Verfahren kann überall dort verwendet werden, wo ein serieller Datenaustausch zwischen zwei Bausteinen erst dann beginnen soll, wenn der eine der Bausteine eine Bereitschaft angegeben hat.

#### Selbsttest

[0193] Der erfindungsgemässe Gaszähler ist mit verschiedenen Funktionen versehen, die einen Selbsttest gestatten. Diese Funktionen können entweder im Digitalteil 32 integriert oder dem Mikrocontroller 73 zugeordnet werden.

[0194] Eine erste Selbsttestfunktion erlaubt, wie oben beschrieben, die Summe der Signale der Thermoelemente zu messen. Hierzu wird der Multiplexer 57 in einen der Zustände 3 oder 4 gebracht. Das so gemessene Signal ist ein Mass für den Temperaturunterschied zwischen dem Halbleitersubstrat 21 und dem Zentrum der Membran 23. Bei einwandfreiem Betrieb des Geräts muss dieser Temperaturunterschied bzw. die Spannung über den Thermoelementen in einem gewissen Sollbereich liegen.

[0195] In einer zweiten Selbsttestfunktion wird die Versorgungsspannung Vdd gemessen. Hierzu wird der Multiplexer 57 in den Zustand 8 gebracht. Weicht die Versorgungsspannung Vdd zu stark von einem Sollwert ab, so wird eine Warnung ausgegeben.

[0196] Weiter kann der Gain der Verstärker A1 bzw. A2 regelmässig überprüft werden. Hierzu wird das Ausgangssignal der Verstärker A1 bzw. A2 bei zwei unterschiedlichen Verstärkungen miteinander verglichen.

[0197] Es ist auch möglich, denn Gain der Verstärker A1 bzw. A2 zu korrigieren, z. B. indem entsprechende Korrekturkapazitäten zugeschaltet werden.

[0198] Wie sich aus den obigen Ausführungen ergibt, betrifft die Erfindung verschiedenste Aspekte auf dem Gebiet der Halbleiter- und Sensortechnik und insbesondere der Gasgebürenzähler. Es ist jedoch zu betonen, dass insbesondere das Sensorelement bzw. der beschriebene Halbleiterbaustein mit Sensorteil, Analogteil und Digitalteil als Bausteine für andere Anwendungen verwendet werden können. Auch die Abschirmungstechnik, die im Zusammenhang mit Fig. 14 erläutert wurde, kann für verschiedenste Anwendungen eingesetzt werden, wo schwache Signale auf integrierten Schaltungen von Störungen geschützt werden sollen.

#### Patentansprüche

1. Gaszähler, gekennzeichnet durch einen Massenflussdetektor (4) zum Messen des Massenflusses eines durch einen Hauptkanal (2, 3) fliessenden Gases und weiter gekennzeichnet durch Mittel (5) zum Integrieren des Massenflusses über die Zeit.

2. Gaszähler nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass er einen nicht-flüchtigen Speicher (72) zum Abspeichern von Zwischenwerten des integrierten Massenflusses aufweist.

3. Gaszähler nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er einen Kartenleser (7) für Wertkarten und ein Ventil (8) zur Unterbrechung des Hauptkanals (2, 3) aufweist.

4. Gaszähler nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass er ausgestaltet ist, um entsprechend einer konsumierten Gasmasse einen Wertspeicher (82) in einer im Kartenleser (7) eingeschobenen Wertkarte (80) nachzuführen und bei Erschöpfung des Wertspeichers (82) das Ventil (8) zu schliessen.

5. Gaszähler nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Radio-Interface (76) zur drahtlosen Übermittlung einer konsumierten Gasmasse an eine Zentrale und/oder zur Übermittlung von Gastarifen von der Zentrale an den Gaszähler.
6. Gaszähler nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er ein Sensorelement (14), einen Analogteil (31) zur analogen Vorverarbeitung der Signale des Sensorelements (14) und zum Erzeugen digitalisierter Daten und einen Digitalteil (32) zum Linearisieren der digitalisierten Daten aufweist. 5
7. Gaszähler nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Sensorelement (14), der Analogteil (31) und der Digitalteil (32) gemeinsam auf einem Halbleitersubstrat (21) integriert sind.
8. Gaszähler nach einem der Ansprüche 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass er einen nicht-flüchtigen Speicher (72) aufweist, welcher Linearisierungskoeffizienten für den Digitalteil (32) und Zwischenwerte des integrierten Massenflusses speichert. 10
9. Gaszähler nach den Ansprüchen 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, dass der nicht-flüchtige Speicher (72) ausserhalb des Halbleitersubstrats (21) angeordnet ist, und dass zusätzlich ein Zwischenspeicher (72a) vorgesehen ist, welcher mindestens einen aus dem nicht-flüchtigen Speicher ausgelesenen Wert zwischenspeichert, derart, dass, falls der zwischengespeicherte Wert nochmals benötigt wird, er vom Zwischenspeicher (72a) ohne Zugriff auf den nicht-flüchtigen Speicher auslesbar ist. 15
10. Gaszähler nach einem der Ansprüche 5–9, dadurch gekennzeichnet, dass er einen Taktgeber (75) aufweist, welcher Taktsignale (T2, T1) für den Analogteil (31) und den Digitalteil (32) erzeugt, wobei die Taktsignale für den Analogteil (31) um eine Zeit  $\Delta t$  gegenüber den Taktsignalen des Digitalteils (32) verzögert sind, und wobei die Zeit  $\Delta t$  so gewählt ist, dass Umschaltvorgänge im Digitalteil (32) beendet sind, wenn die Taktsignale für den Analogteil (31) erzeugt werden. 20
11. Gaszähler nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er zum Integrieren des Massenflusses einen Mikrocontroller (73) aufweist.
12. Gaszähler nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass er einen nicht-flüchtigen Speicher (72) aufweist, welcher Linearisierungskoeffizienten für den Digitalteil (32) und Zwischenwerte des integrierten Massenflusses speichert, und dass der Mikrocontroller (73) über den Digitalteil (32) mit dem nicht-flüchtigen Speicher (72) verbunden ist. 25
13. Gaszähler nach einem der Ansprüche 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Digitalteil (32) unabhängig vom Mikrocontroller (73) betreibbar ist.
14. Gaszähler nach einem der Ansprüche 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, dass zur Reduktion des Stromverbrauchs der Mikrocontroller (73) dazu ausgestaltet ist, den Massenflussdetektor periodisch ein- und auszuschalten. 30
15. Gaszähler nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er einen Hauptkanal (2, 3) aufweist und dass der Massenflussdetektor (4) einen Bypass (10) parallel zum Hauptkanal (2, 3) umfasst.
16. Gaszähler nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass das Gas bei der Messung im Bypass (10) eine Flussgeschwindigkeit  $v_B$  und im Hauptkanal eine Flussgeschwindigkeit  $v_H$  aufweist, welche über eine Funktion  $F$  verknüpft sind durch  $v_B = F(v_H)$ , und zumindest in einem unteren Bereich von 10% des Messbereichs die Abweichung von  $F(v_H)$  von einem linearen Verhalten höchstens 10% beträgt, und/oder dass zumindest im unteren Bereich gilt 35
- $$\frac{\partial^2 F(v_H)}{\partial^2 v_H} \leq 0, \quad 40$$
- und insbesondere 45
- $$\frac{\partial^2 F(v_H)}{\partial^2 v_H} < 0,$$
- so dass  $v_B$  bei abnehmender Flussgeschwindigkeit zunehmend stärker von  $v_H$  abhängt. 50
17. Gaszähler nach Anspruch 16, wobei über dem Bypass (10) ein Druckabfall  $\Delta p$  herrscht, wobei gilt
- $$\Delta p \propto a_1 \cdot v_B + a_2 \cdot v_B^2 \text{ und } \Delta p \propto v_H.$$
18. Gaszähler nach einem der Ansprüche 15–17, dadurch gekennzeichnet, dass der Bypass (10) mit Mündungen (12', 13') in den Hauptkanal mündet, wobei im Hauptkanal zwischen den Mündungen ein linearer Strömungswiderstand (15') angeordnet ist. 55
19. Gaszähler nach einem der Ansprüche 15–18, dadurch gekennzeichnet, dass im Hauptkanal parallel zum Bypass (10) eine Venturi-Düse (20'') angeordnet ist.
20. Gaszähler nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er ausgestaltet ist zum verschlüsselten Anzeigen eines Gasverbrauchs auf einer Anzeige (6). 60
21. Gaszähler nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er eine elektronische Uhr (78) aufweist, und insbesondere dass er ausgestaltet ist, um zeitabhängige Tarifsätze zu verarbeiten.
22. Verfahren zum Ermitteln einer konsumierten Gasmenge zwecks Gebührenberechnung, dadurch gekennzeichnet, dass der Massenfluss des konsumierten Gases gemessen und über die Zeit integriert wird, um aus der so ermittelten Masse eine Gebühr zu berechnen. 65
23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass der Massenfluss gemessen wird, indem ein Teil der Gasmenge über einen Massenflussdetektor geführt wird, der eine Heizung (24) aufweist, wobei vor und nach der



Heizung die Temperatur des Gases gemessen wird.

24. Massenflusssensor, insbesondere für den Gaszähler nach einem der vorangehenden Ansprüche, mit einem Halbleitersubstrat (21) und einem Sensorelement (14), wobei das Sensorelement (14) eine im Halbleitersubstrat (21) über einer Öffnung (22) angeordnete Membran (23), eine sich über die Membran erstreckende Heizung (24) und beidseitig der Heizung (24) angeordnete Temperatursensoren (25, 26) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass auf dem Halbleitersubstrat ein Analogteil (31) zur analogen Vorverarbeitung der Signale der Temperatursensoren und zum Erzeugen digitalisierter Daten integriert ist, und dass auf dem Halbleitersubstrat ein Digitalteil (32) zum Linearisieren der digitalisierten Daten integriert ist.

25. Massenflusssensor nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass der Analogteil (31) auf dem Halbleitersubstrat (21) zwischen dem Sensorelement (14) und dem Digitalteil (32) angeordnet ist.

26. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 24 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass jeder Temperatursensor (25, 26) über je zwei Verbindungsleitungen (35) mit dem Analogteil (31) verbunden ist, und dass die beiden Verbindungsleitungen (35) jedes Temperatursensors parallel nebeneinander verlaufen.

27. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 24–26, dadurch gekennzeichnet, dass der Analogteil (31) einen Verstärker (A1, A2) mit mehreren Verstärkerstufen (A11, A12, A13, A14) aufweist, die zum Einstellen der Verstärkung wahlweise hinzuschaltbar sind, und insbesondere dass die Verstärkung mindestens in einem Bereich zwischen 1 und 625 wählbar ist.

28. Massenflusssensor nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass die Verstärkerstufen (A11, A12, A13, A14) Verstärker mit geschalteten Kapazitäten sind und dass aufeinander folgende Verstärkerstufen um 180° phasenverschoben getaktet sind.

29. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 27 oder 28, dadurch gekennzeichnet, dass der Digitalteil (32) ausgestaltet ist um, abhängig von der Grösse der digitalisierten Daten, die Verstärkung des Verstärkers (A1, A2) einzustellen.

30. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 24 bis 29, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest der Analogteil (31) und der Digitalteil (32) als CMOS-Schaltungen ausgestaltet sind mit einer minimalen Gatelänge unterhalb 1 µm.

31. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 24 bis 30, dadurch gekennzeichnet, dass der Digitalteil (32) einen nicht-flüchtigen Speicher (74) aufweist, insbesondere mit einer Kapazität von mindestens 20 Bits.

32. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 24 bis 31, dadurch gekennzeichnet, dass der Analogteil (32) mindestens 100 Transistoren umfasst und/oder dass der Digitalteil mindestens 1000 Gatter umfasst.

33. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 24 bis 32, dadurch gekennzeichnet, dass er einen Sensor (40) zum Messen einer Substrattemperatur und/oder einer Umgebungstemperatur aufweist, wobei der Digitalteil (32) ausgestaltet ist, die Substrat- bzw. Umgebungstemperatur mit den digitalisierten Daten der Temperatursensoren (25, 26) zu verknüpfen, um eine Temperaturabhängigkeit der digitalisierten Daten zu reduzieren.

34. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 24 bis 33, dadurch gekennzeichnet, dass auf dem Halbleitersubstrat ein Sensorteil (30) angeordnet ist, der das Sensorelement (14) umfasst und keine Transistoren aufweist und der sich über eine ganze Breite des Halbleitersubstrats (21) erstreckt.

35. Massenflusssensor, insbesondere nach einem der vorangehenden Ansprüche, mit einem Halbleitersubstrat (21), mit einer im Halbleitersubstrat (21) über einer Öffnung (22) angeordneten Membran (23), mit einer sich über die Membran erstreckenden Heizung (24) und mit beiderseits der Heizung (24) angeordneten Temperatursensoren (25, 26), dadurch gekennzeichnet, dass die Heizung (24) aus mehreren Widerständen (R1a, R1b, R1c) besteht, welche sich parallel zueinander als Leiterbahnen über die Membran (23) erstrecken und auf einer ersten Randseite der Membran miteinander verbunden sind.

36. Massenflusssensor nach Anspruch 35, dadurch gekennzeichnet, dass er mindestens zwei Versorgungsleitungen (36) für die Heizung (24) aufweist, welche auf einer der ersten Randseite gegenüberliegenden, zweiten Randseite der Membran mit den Leiterbahnen verbunden sind.

37. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 35 oder 36, dadurch gekennzeichnet, dass die Widerstände in zwei in Serie geschaltete Widerstandsgruppen (R1a; R1b, R1c) aufgeteilt sind, und dass der Massenflusssensor eine Heizungssteuerung (50) aufweist, welche einen Strom durch beide Widerstandsgruppen so regelt, dass eine Spannung über einer ersten (R1b, R1c) der Widerstandsgruppen konstant ist, und insbesondere dass ein Operationsverstärker (55) vorgesehen ist, an dessen invertierendem Eingang eine Spannung zwischen den Widerstandsgruppen und an dessen nicht-invertierendem Eingang eine Referenzspannung (Vbg) anliegt und dessen Ausgang den Strom durch die Widerstandsgruppen erzeugt.

38. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 35 bis 37, dadurch gekennzeichnet, dass die Widerstände PTC-Widerstände sind.

39. Massenflusssensor, insbesondere nach einem der vorangehenden Ansprüche, mit einem Halbleitersubstrat (21), mit einer im Halbleitersubstrat (21) über einer Öffnung (22) angeordneten Membran (23), mit einer sich über die Membran erstreckenden Heizung (24) und mit beiderseits der Heizung (24) angeordneten Temperatursensoren (25, 26), dadurch gekennzeichnet, dass über der Membran eine tensile Passivierungsschicht (28) zur Straffung der Membran (23) angeordnet ist.

40. Massenflusssensor nach Anspruch 39, dadurch gekennzeichnet, dass die Passivierungsschicht (28) eine Tensilität von mindestens 100 MPa aufweist.

41. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 39 oder 40, dadurch gekennzeichnet, dass die Passivierungsschicht (28) Siliziumoxid, Siliziumnitrid oder Polymer, insbesondere Polyimid, aufweist oder aus mindestens einem dieser Materialien besteht.

42. Massenflusssensor, insbesondere nach einem der vorangehenden Ansprüche, mit einem Halbleitersubstrat (21), mit einer im Halbleitersubstrat (21) über einer Öffnung (22) angeordneten Membran (23), mit einer sich über die Membran erstreckenden Heizung (24), mit beidseits der Heizung (24) angeordneten Temperatursensoren (25, 26)



und mit weiteren, auf dem Halbleitersubstrat integrierten Elementen (31, 32), dadurch gekennzeichnet, dass um die Membran herum eine Scribe Line (33') angeordnet ist, welche die weiteren Elemente (31, 32) von der Membran abschirmt.

43. Massenflusssensor nach Anspruch 42, dadurch gekennzeichnet, dass die weiteren Elemente Schaltelemente umfassen, welche in Gruppen (31, 32) zusammengefasst sind, wobei jede Gruppe von einer Scribe Line (33) umfasst ist.

44. Massenflusssensor nach einem der Ansprüche 42 bis 43, dadurch gekennzeichnet, dass auf dem Halbleitersubstrat (21) mindestens eine Halbleiter- oder Metallschicht (42, 44, 46) und darunter eine isolierende Schicht (41, 43, 45) aufgebracht ist, wobei die isolierende Schicht im Bereich der Scribe Line unterbrochen und die Metallschicht auf das Halbleitersubstrat (21) abgesenkt ist.

45. Massenflusssensor, insbesondere nach einem der vorangehenden Ansprüche, mit einem Halbleitersubstrat (21), mit einer im Halbleitersubstrat (21) über einer Öffnung (22) angeordneten Membran (23), mit einer sich über die Membran erstreckenden Heizung (24), mit beidseits der Heizung (24) angeordneten Thermoelementen (25, 26) dadurch gekennzeichnet, dass er einen Selbsttest-Mechanismus (32, 73) aufweist, der ausgestaltet ist, die Spannung über mindestens einem der Thermoelemente mit einem Sollbereich zu vergleichen.

46. Massenflusssensor nach Anspruch 45, dadurch gekennzeichnet, dass der Selbsttest-Mechanismus (32, 73) ausgestaltet ist, um die Summe der Spannungen über den Thermoelementen mit dem Sollbereich zu vergleichen.

47. Halbleiterbaustein, insbesondere Sensor, mit einem Halbleitersubstrat (21) und mit mindestens einer auf dem Halbleiterbaustein integrierten Leitung (35), dadurch gekennzeichnet, dass die Leitung (35) von einem Schirm (46, 48) aus leitfähigem Material umgeben ist.

48. Halbleiterbaustein nach Anspruch 47, dadurch gekennzeichnet, dass der Schirm von einer leitenden Diffusionsschicht (48) im Halbleitersubstrat (21) und einer mit der Diffusionsschicht elektrisch verbundenen, leitfähigen Deckschicht (46) gebildet wird.

49. Halbleiterbaustein nach Anspruch 48, dadurch gekennzeichnet, dass die Leitung (35) auf einer isolierenden Schicht (41), vorzugsweise aus Glas oder  $\text{SiO}_2$ , angeordnet ist, welche sie von der Diffusionsschicht (48) trennt.

50. Halbleiterbaustein nach einem der Ansprüche 48 oder 49 dadurch gekennzeichnet, dass die Leitung (35) von einer isolierenden Schicht (45), vorzugsweise aus Glas oder  $\text{SiO}_2$ , bedeckt ist, welche sie von der Deckschicht (46) trennt, wobei die Deckschicht (46) seitlich entlang der Leitung (35) mit der Diffusionsschicht (48) verbunden ist.

51. Halbleiterbaustein nach einem der Ansprüche 47 bis 50, dadurch gekennzeichnet, dass er einen auf dem Halbleiterbaustein integrierten Sensor (14) und eine Auswerteschaltung (31, 32) aufweist, wobei die vom Schirm (46, 48) umgebene Leitung (35) den Sensor (14) mit der Auswerteschaltung (31, 32) verbindet.

52. Verfahren zum seriellen Datenaustausch zwischen einem ersten (73) und einem zweiten (32) Baustein, wobei der erste Baustein (73) den zweiten Baustein (32) über ein Anwählsignal (CS) anwählt und ein Clocksignal (Clk) erzeugt um Daten über eine Datenleitung aus dem zweiten Baustein auszulesen, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Baustein (32) nach dem Empfang des Anwählsignals auf der Datenleitung ein Zustandssignal (R) erzeugt, welches in einen aktiven Zustand geht, sobald der zweite Baustein zur Ausgabe von Daten bereit ist.

53. Verfahren nach Anspruch 52, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Baustein (73) das Clocksignal (Clk) erst erzeugt, wenn das Zustandssignal in den aktiven Zustand geht, wobei eine erste Flanke des Clocksignals dem zweiten Baustein (32) anzeigt, dass er ein erstes Datenbit auszugeben hat.

Hierzu 11 Seite(n) Zeichnungen

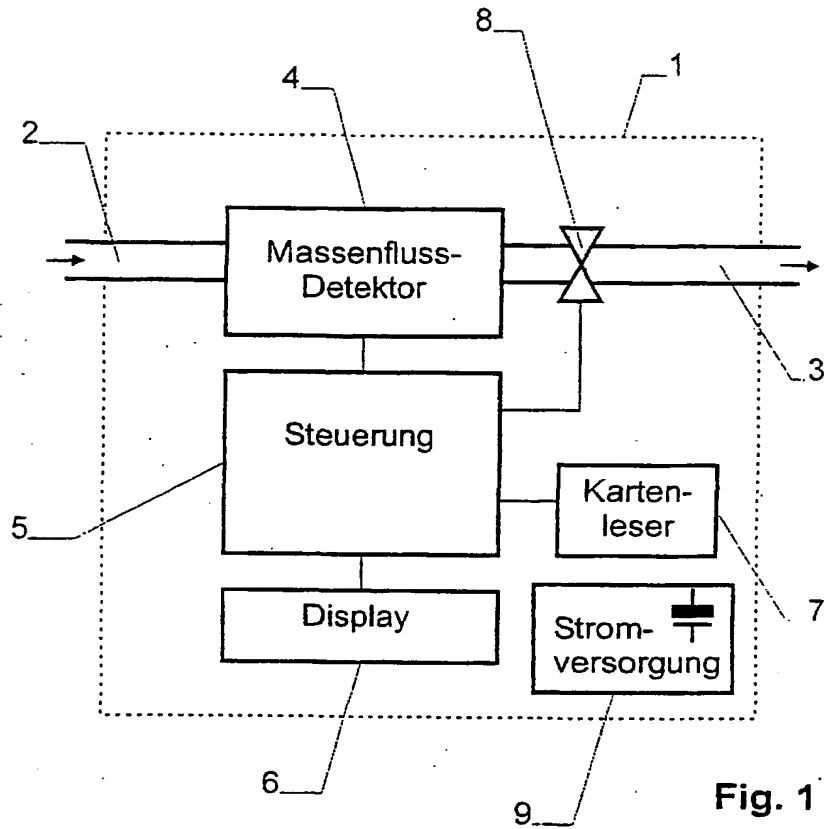


Fig. 1

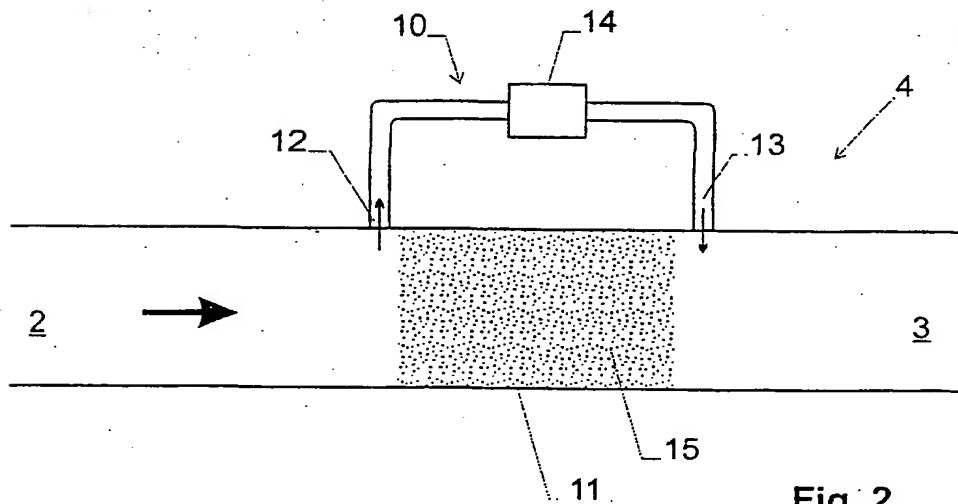


Fig. 2

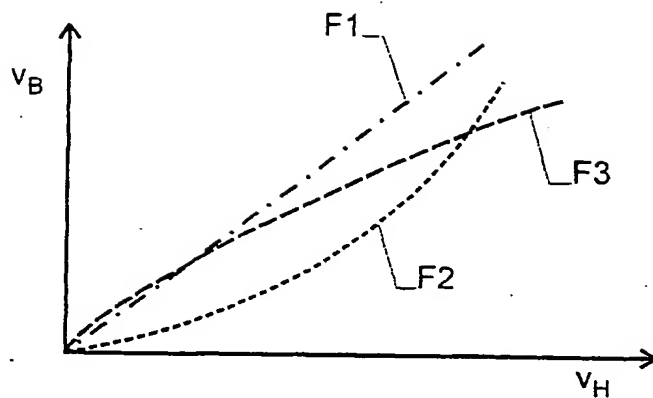


Fig. 3

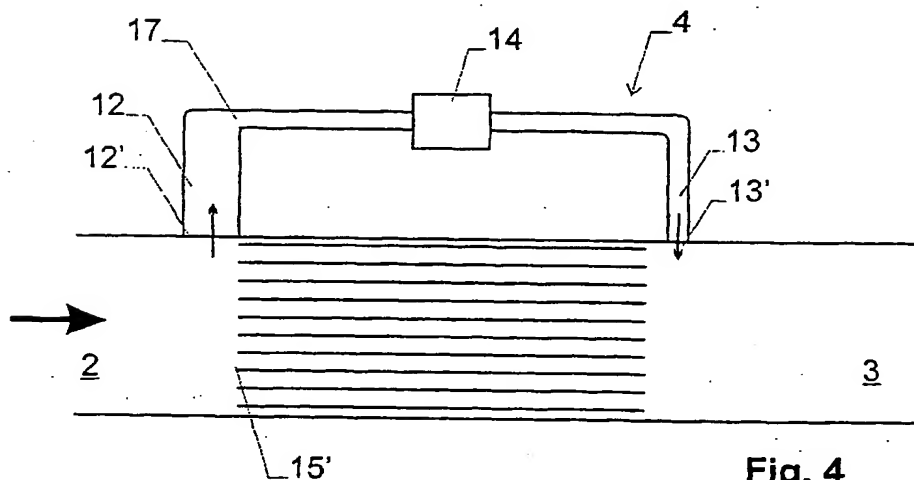


Fig. 4

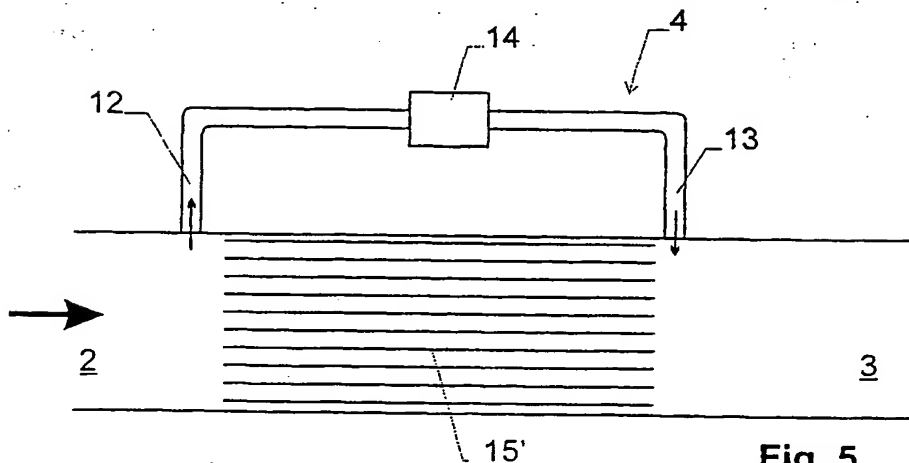


Fig. 5

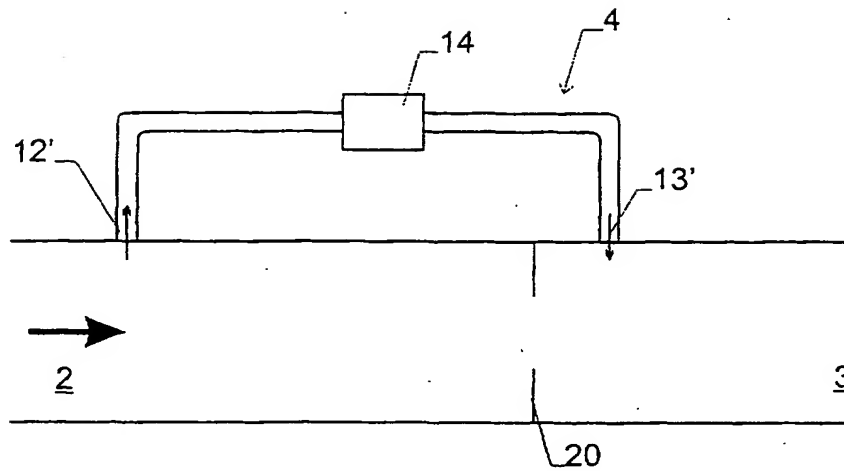


Fig. 6

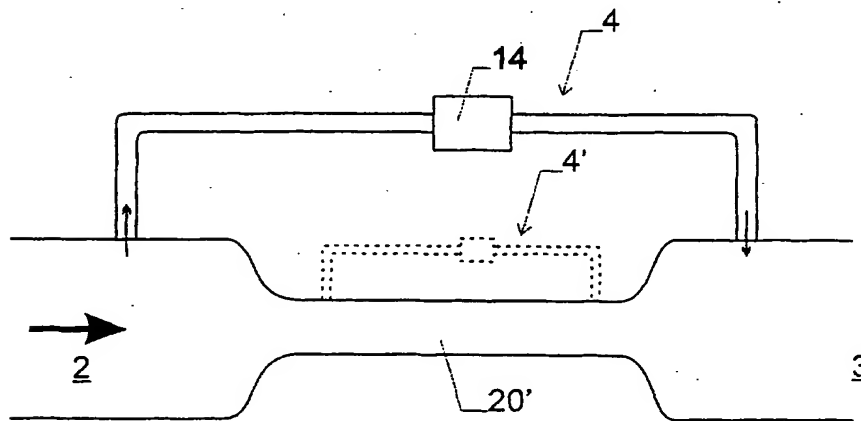


Fig. 7

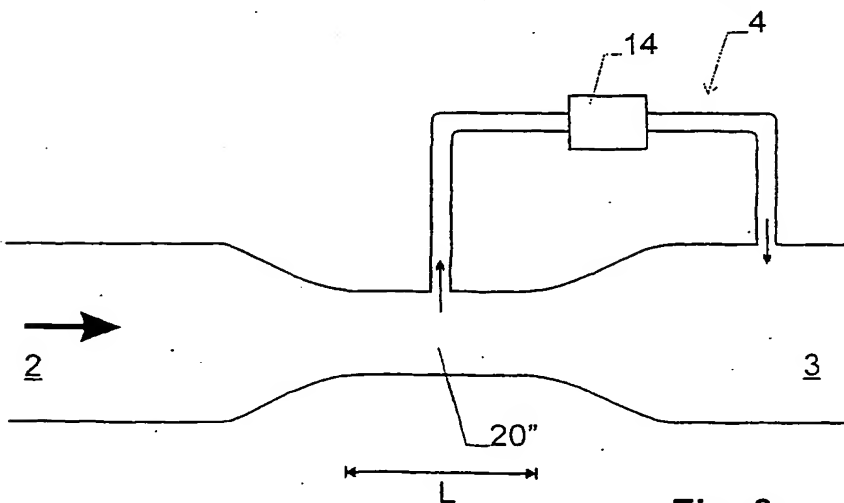


Fig. 8

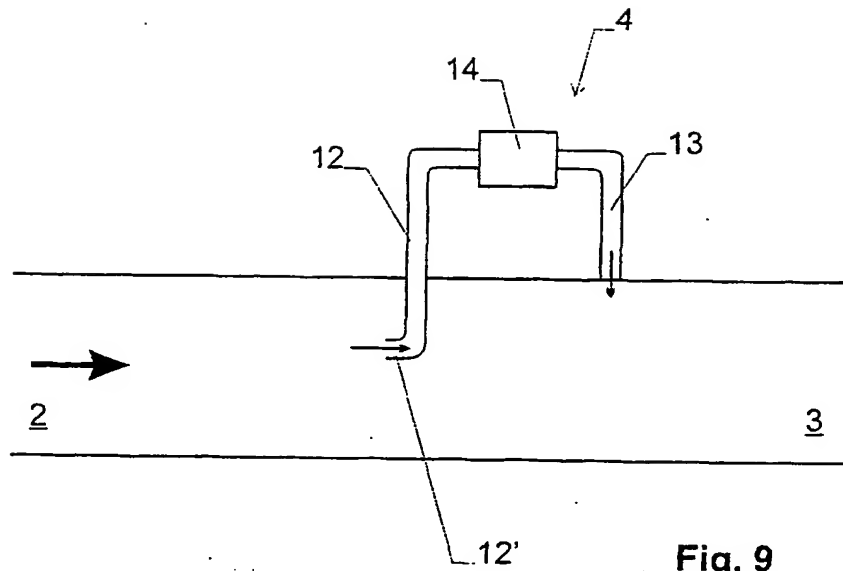


Fig. 9

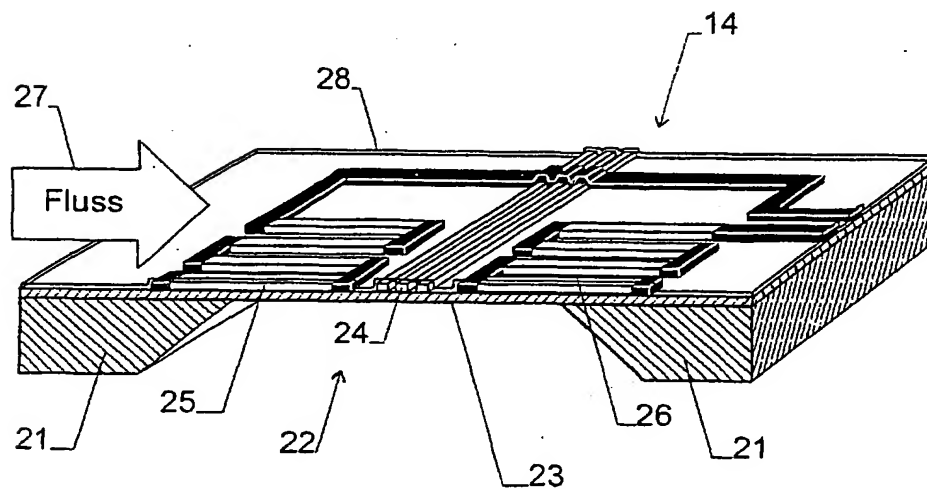
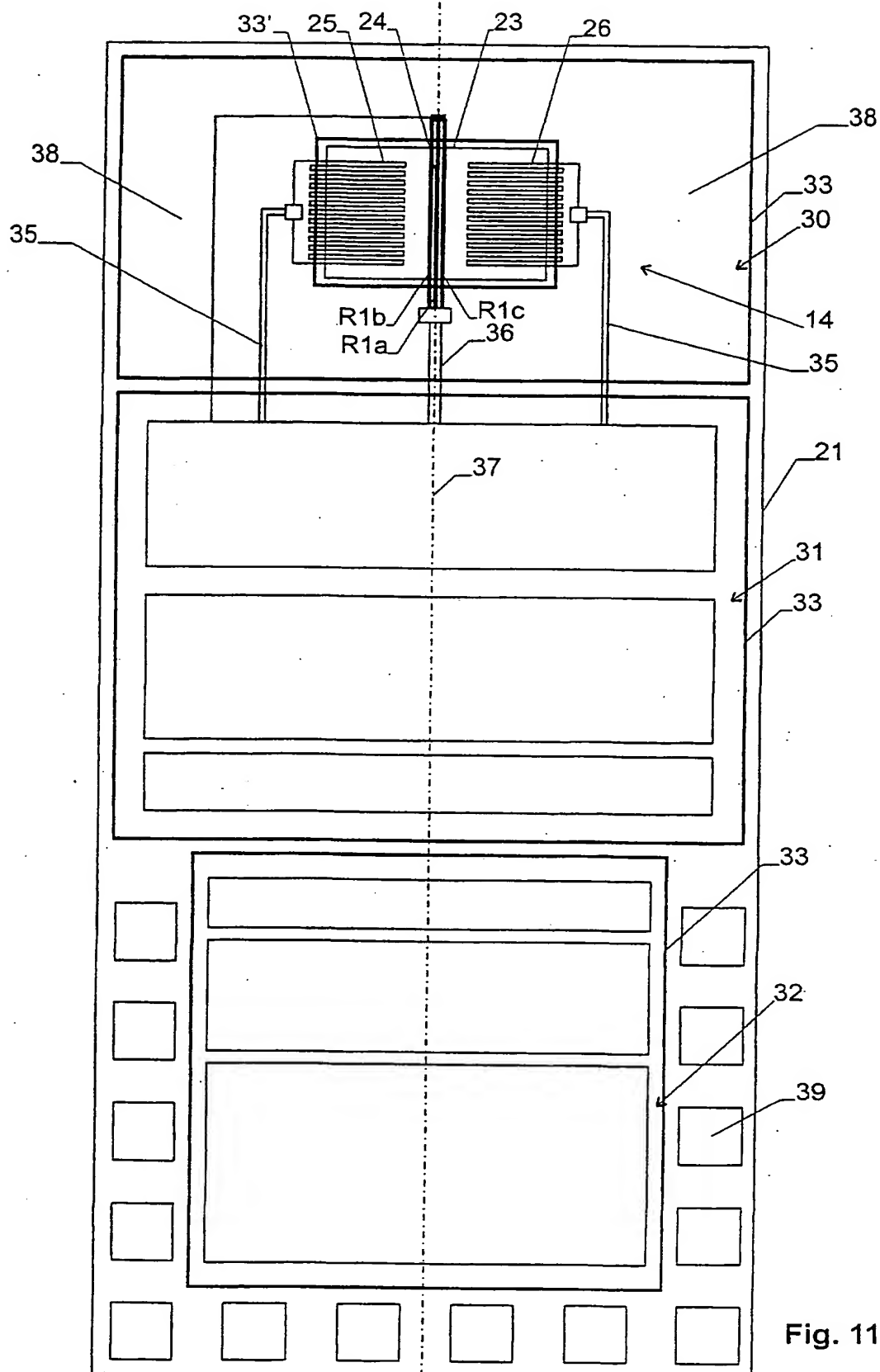


Fig. 10

5/11



**Fig. 11**

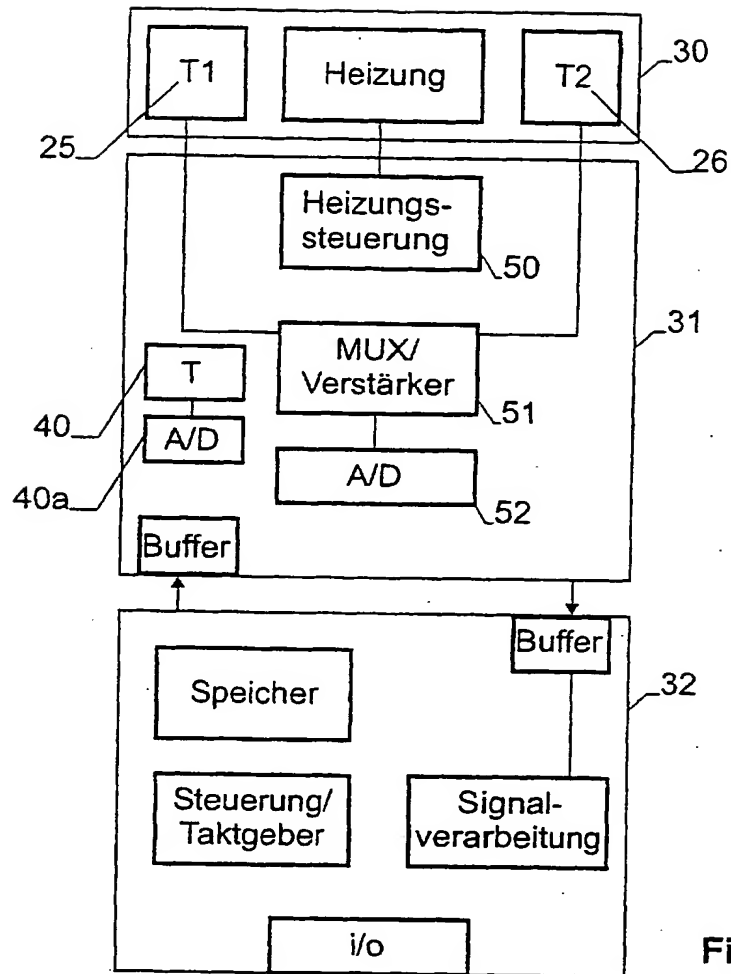


Fig. 12

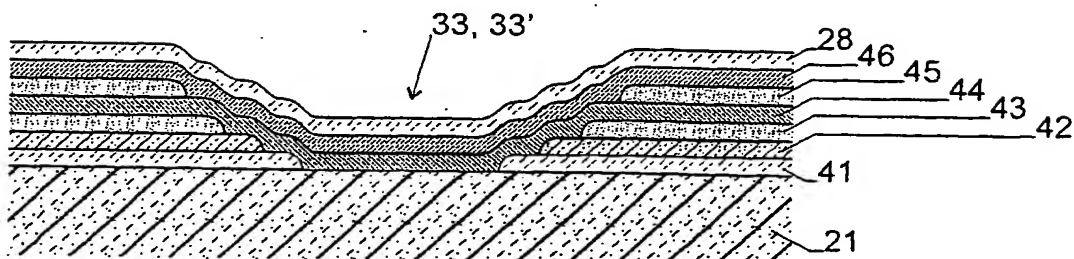
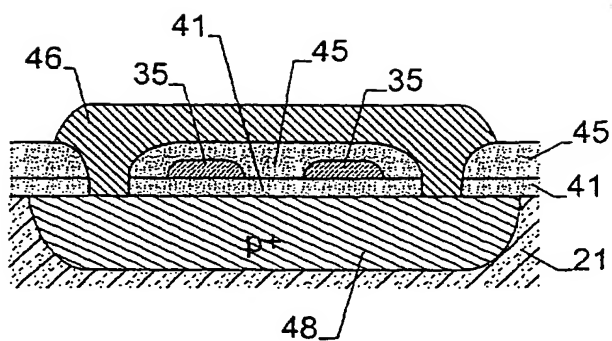
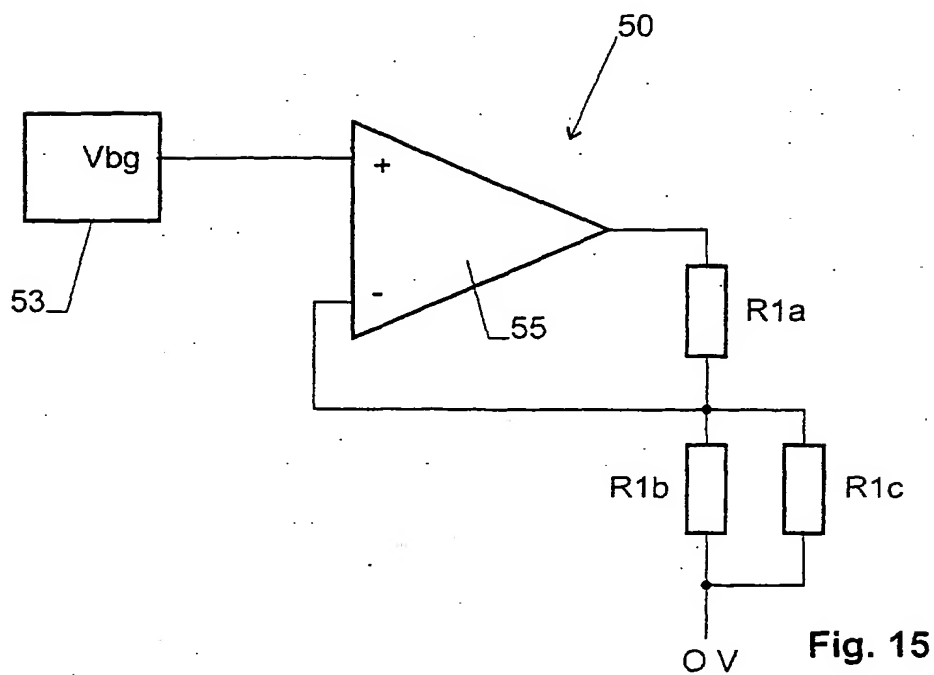


Fig. 13





**Fig. 14**



**Fig. 15**

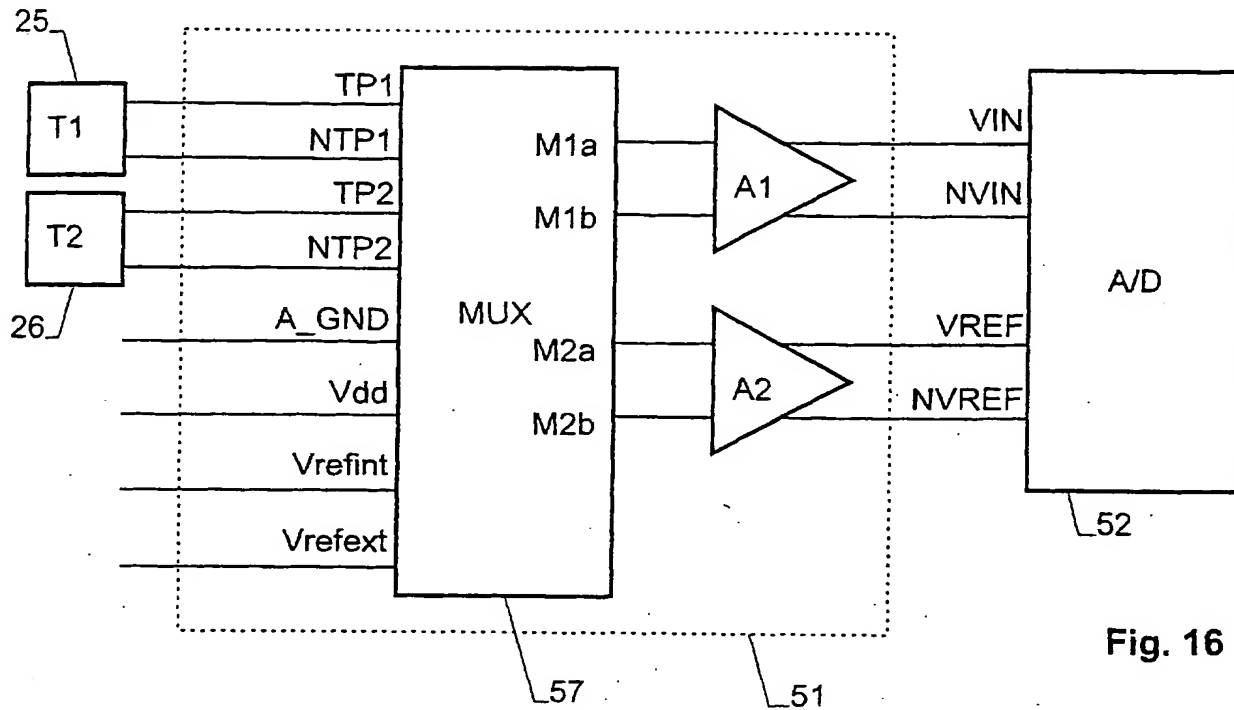


Fig. 16

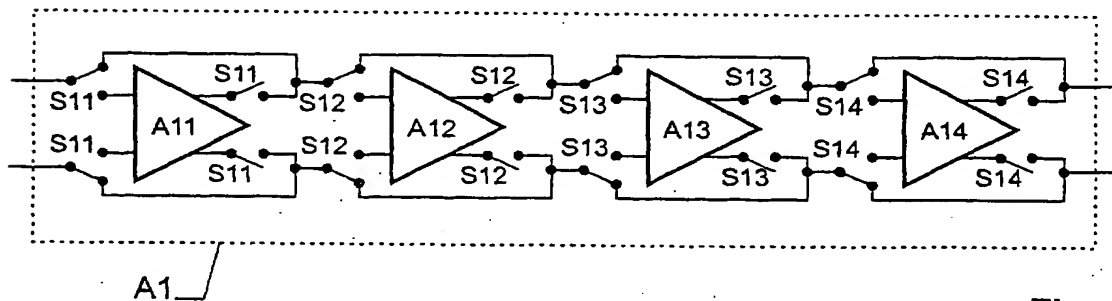


Fig. 17

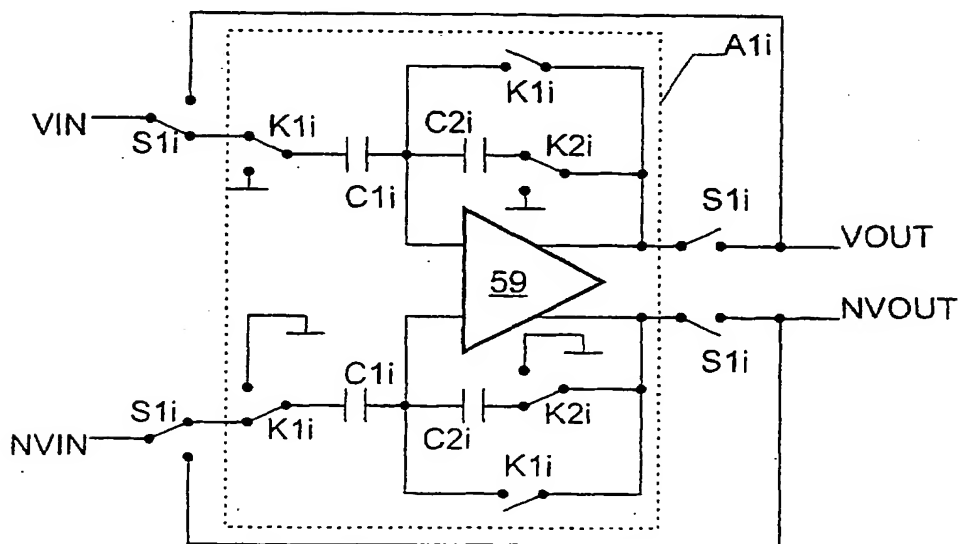


Fig. 18

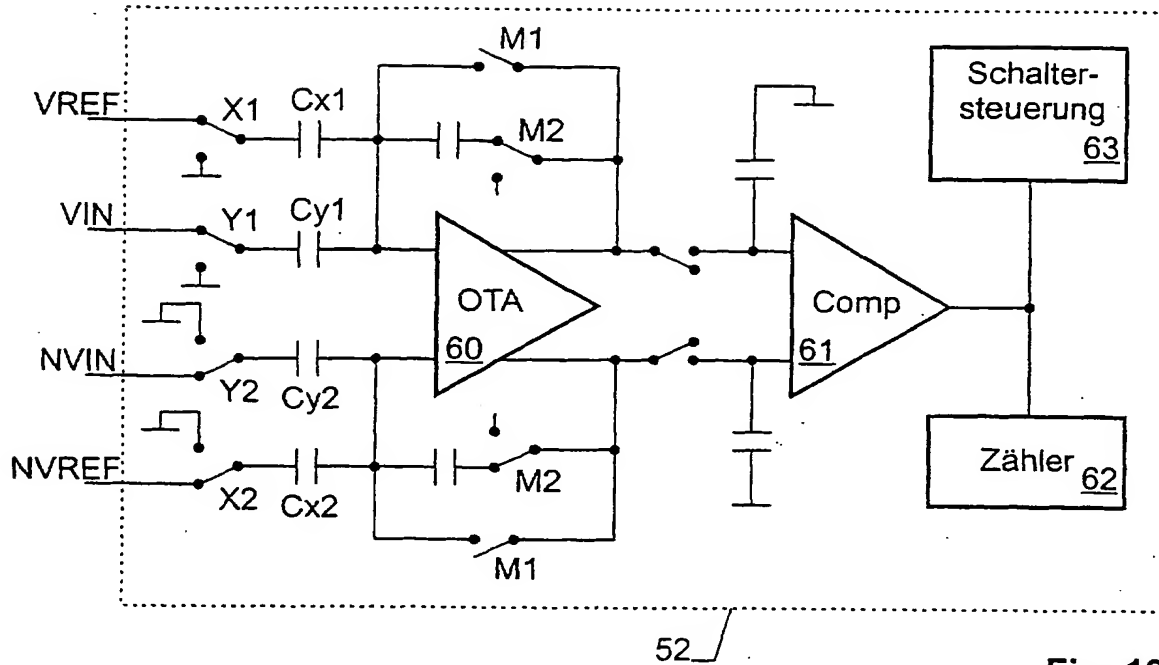


Fig. 19

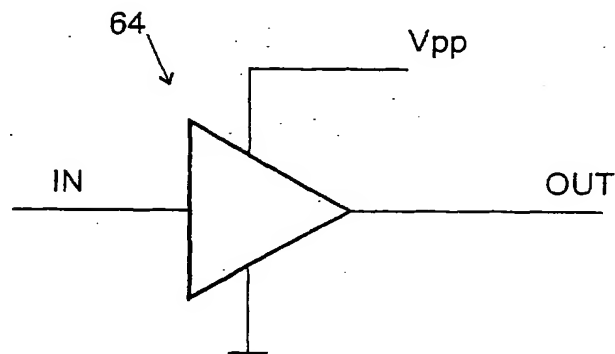


Fig. 20

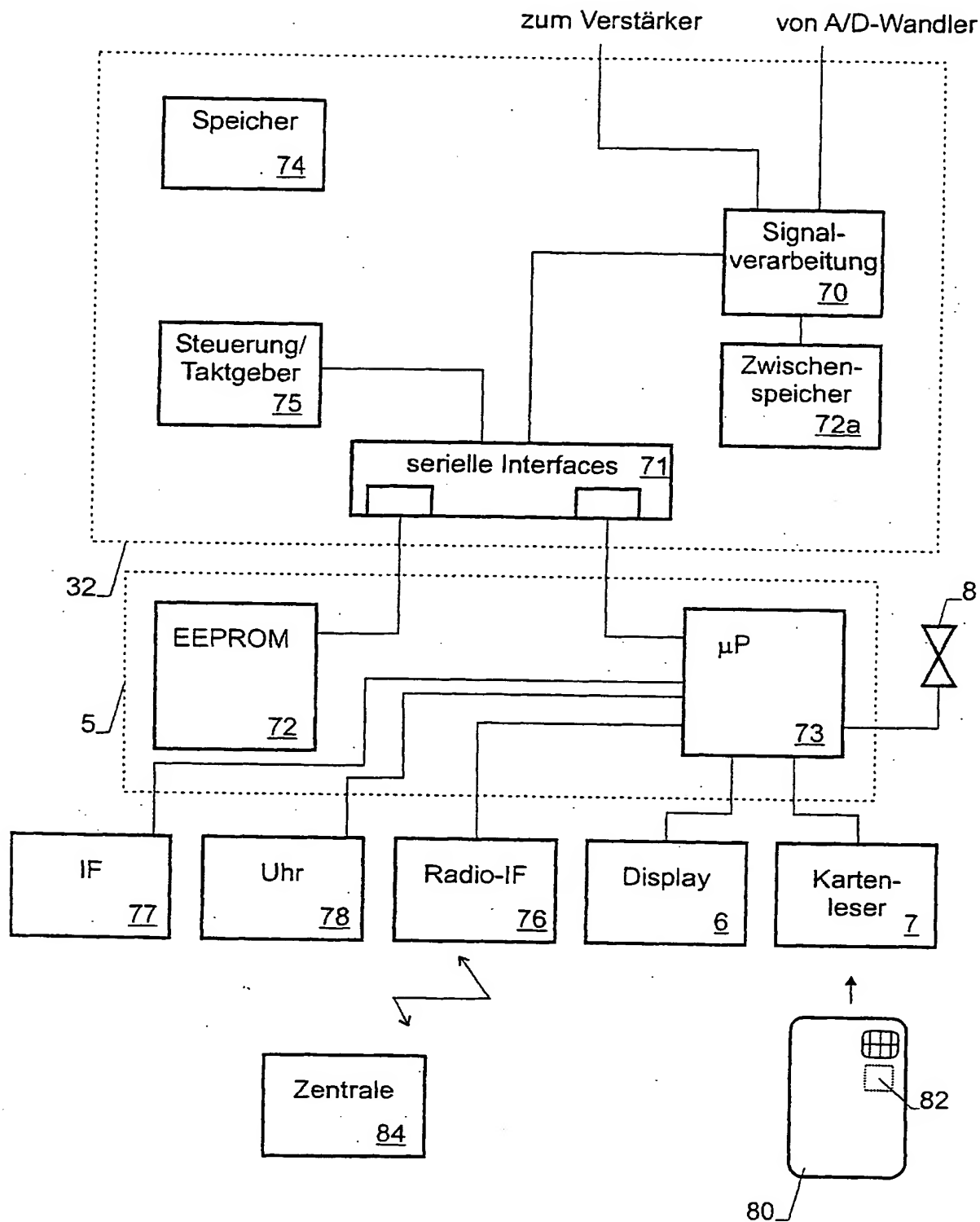


Fig. 21

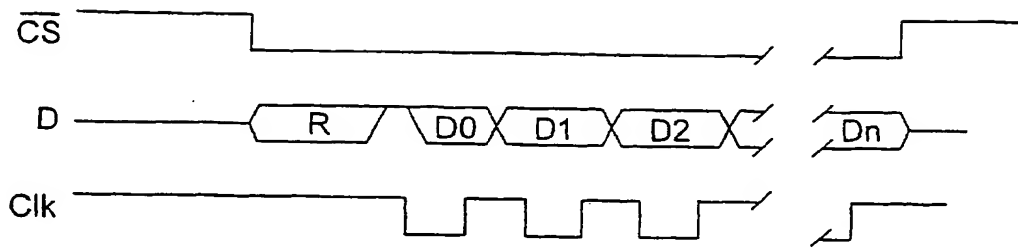


Fig. 22

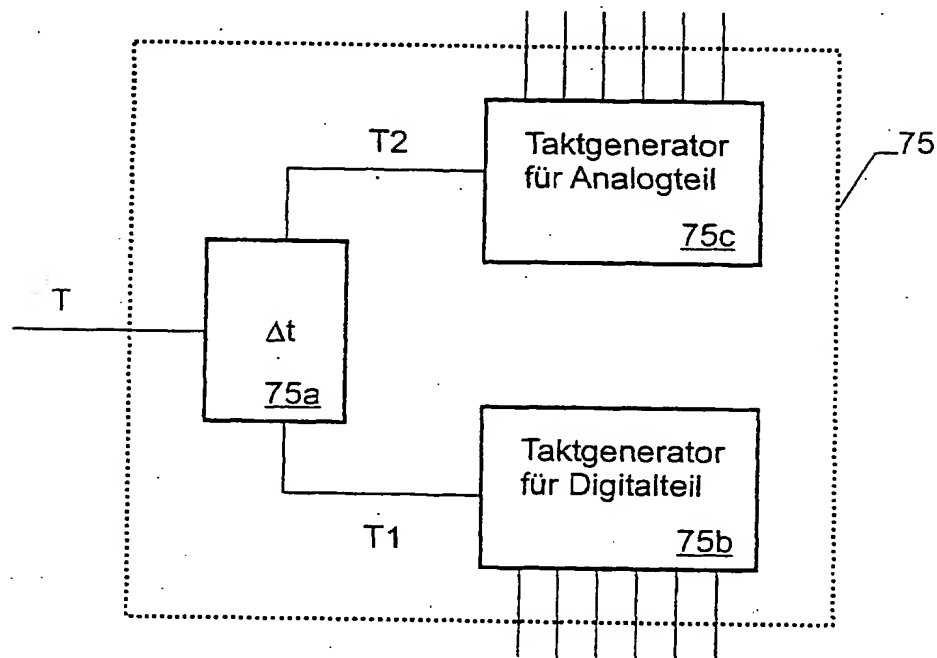


Fig. 23

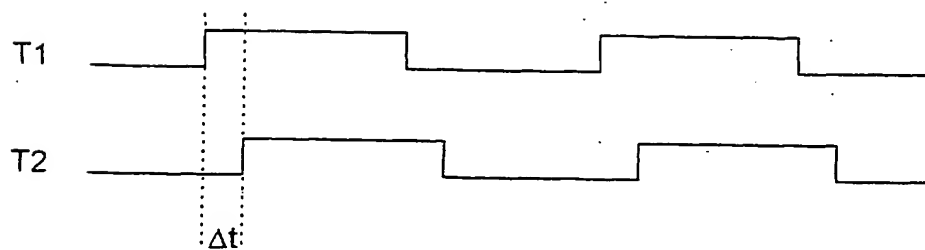


Fig. 24